

PHILIPPS-UNIVERSITÄT MARBURG
INSTITUT FÜR MEDIZIN, TRAINING UND GESUNDHEIT

PHYSIOLOGISCHES ANFORDERUNGSPROFIL SQUASH

BELASTUNG, BEANSPRUCHUNG, ENERGIEBEREITSTELLUNG UND
KÖRPERLICHE LEISTUNGSFÄHIGKEIT IM HERRENEINZEL IN
ABHÄNGIGKEIT VON SPIELNIVEAU UND SIEG UND NIEDERLAGE

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung der Doktorwürde der Philosophie (Dr. phil.)
des Fachbereichs Erziehungswissenschaften
der Philipps-Universität Marburg

vorgelegt von
Anna Katharina DUNST
aus
Paderborn

Erstgutachter
Prof. Dr. Ralph BENEKE

Zweitgutachter
Prof. Dr. Olaf HOOS

Marburg (Lahn), April 2019

Danksagung

Die vorliegende Arbeit wurde am Institut für Medizin, Training und Gesundheit der Philipps-Universität Marburg angefertigt. An dieser Stelle möchte ich zunächst Prof. Dr. Ralph Beneke für seine langjährige wissenschaftliche Betreuung und die zahlreichen anregenden fachlichen Diskussionen danken.

Des Weiteren danke ich Max Niemeyer, Dr. Renate Leithäuser und meinen Freunden Anne-Kathrin Weiß, Theresa Goy, Theresa Schmidt und Giulia Sortino für ihre tatkräftige Unterstützung während der mehrjährigen und zum Teil sehr aufwendigen empirischen Datenerhebung.

Weiterhin bedanke ich mich bei Dr. Roman Pahl für die Unterstützung im Bereich der statistischen Analyse und bei Janina Bein für ihre fachliche Expertise im Bereich Squash.

Ein besonderer Dank gilt jedoch dem Bundestrainergespann des DSQV Oliver Pettke und Rainer Müller, die mich mit außerordentlichem Engagement von der Themenfindung bis zur Abgabe begleitet und unterstützt haben.

Auch möchte ich mich nochmal bei allen Probanden für ihre Bereitschaft zur Teilnahme an der Studie bedanken.

Abschließend möchte ich mich ausdrücklich bei meinen Eltern bedanken, die mir immer zur Seite stehen und mich während meines gesamten Studiums und in Promotionsphase in jeder nur denkbaren Form unterstützt haben.

Zusammenfassung

Trotz weltweit zunehmender Beliebtheit mangelt es an aktuellen wissenschaftlichen Erkenntnissen zum physiologischen Anforderungsprofil von Squash. Die wesentlichen Komponenten der körperlichen Leistungsfähigkeit (KPIs: *key performance indicators*) sind primär auf Grund unvollständiger und antiquierter Forschungsergebnisse derzeit nicht bekannt. Somit ist beispielsweise bisher nicht klar, wie die Energiebereitstellung im Spiel erfolgt und ob diesbezüglich Unterschiede in Abhängigkeit von Spielniveau oder Sieg und Niederlage existieren. Auch ist fraglich, ob die bisherige Erkenntnislage zu Beanspruchung und körperlicher Leistungsfähigkeit im Squash aktuell noch ihre Gültigkeit hat. In Ermangelung der Kenntnis der wesentlichen Komponenten der körperlichen Leistungsfähigkeit (KPIs: *key performance indicators*) sowie etwaiger Spielniveauspezifika im Squash ist es folglich bisher kaum möglich, evidenzbasierte Richtlinien für Leistungsdiagnostik und Trainingspraxis zu erstellen, um die körperliche Leistungsfähigkeit eines Spielers gezielt zu erhöhen. Vor dem beschriebenen Hintergrund ist es das Ziel dieser Studie, die Belastung, Beanspruchung und Energiebereitstellung im Squash in Abhängigkeit von Spielniveau und Sieg und Niederlage zu beschreiben sowie Zusammenhänge insbesondere zu leistungsdiagnostischen Testverfahren zu identifizieren, um so die wesentlichen Komponenten der körperlichen Leistungsfähigkeit erfolgreicher Squashspieler zu bestimmen und diese zukünftig durch leistungsdiagnostische Untersuchungen abbilden zu können. Die Betrachtung verschiedener Spielniveaus sowie die zusätzliche Berücksichtigung des Faktors Erfolg dienen diesbezüglich einer Ausdifferenzierung und Konkretisierung der KPIs.

Die Ergebnisse stellen eine Aktualisierung der bisherigen Daten zur zeitlichen Belastungsstruktur und körperlichen Beanspruchung im Squash dar und erweitern die bisherige Forschung um ein detailliertes energetisches Profil mit Einblick in verschiedene im Spiel auftretende Aktivitäten und Veränderungen im Spielverlauf. Obwohl sich die physiologischen Anforderungen der Sportart im letzten Jahrzehnt deutlich geändert zu haben scheinen, bestätigen die Ergebnisse den Charakter einer intermittierenden Mehrfachsprintsportart mit hoher durchschnittlicher Belastungsintensität. Die Energiebereitstellung im Squash ist sportartcharakteristisch und erfolgt dominant aerob hauptsächlich unterstützt durch den anaerob alaktaziden Energiestoffwechsel. Die Vermutung einer hohen Beteiligung des anaerob laktaziden Energiestoffwechsels an der Energiebereitstellung im Squash und einer daraus abgeleiteten Notwendigkeit einer möglichst hohen Blutlaktattoleranz scheint durch die Ergebnisse dieser Arbeit widerlegt. Die körperliche Leistungsfähigkeit ist spielniveau- und spielstärkendeterminierend, in spielstärkenhomogenen Begegnungen jedoch nicht der entscheidende

Faktor für Erfolg. Neben einer herausragenden aeroben Leistungsfähigkeiten sollten Squashspieler über ein gutes bis exzellentes Level an Reaktionsschnelligkeit, Beweglichkeit, Koordination und squaspezifischer Agilität verfügen. Die innerhalb dieser Arbeit entwickelte sportmotorische Testbatterie ermöglicht eine Trennung zwischen Spielern auf nationalem und regionalem Spielniveau. Um alle wesentlichen Komponenten der körperlichen Leistungsfähigkeit im Sinne einer komplexen Leistungsdiagnostik abzubilden, sollte diese jedoch gezielt ergänzt werden. Die auf Basis der Ergebnisse dieser Arbeit entwickelten Normtabellen können dazu dienen, den Leistungsstand eines Spielers in Relation zur deutschen Elite zu beurteilen und Trainingsempfehlungen auszusprechen. Generell können die neugewonnenen Erkenntnisse insbesondere zur Energiebereitstellung sowie den wesentlichen Komponenten der körperlichen Leistungsfähigkeit dazu dienen, die Trainingsinhalte mit Blick auf eine gezielte Entwicklung der körperlichen Leistungsfähigkeit im Squash zu optimieren.

Abstract

Despite its worldwide increasing popularity squash has not been given much attention regarding scientific research until now, so that it predominantly lacks a physiological requirement profile and key performance indicators. Thus, questions concerning the mode of energy supply during match and possible (inter-)dependencies of these with regards to the level of play or the result of a match remain unanswered. Furthermore does the validity of the most recent findings on stress and physiological performance of squash seem rather dispectable. Thus is why it is currently still difficult to create evidence-based practice guidelines which seek to increase a player's performance systematically in terms of a physiological level. So the aim of this study was to describe the stress, strain and energy supply in squash depending on the level of play and victory and defeat, to identify relationships, changes in the course of the game and dividing variables and to determine physiological characteristics of successful squash players at national and regional level.

The results update the existing data on stress and strain and extend the previous research to a detailed energetic profile with insight into various activities and changes in the gameplay. They still indicate a high metabolic rate in squash, although the demands have changed over the last decade. Against expectations and despite the repetitive burst of high effort as well as average high intensity aerobic metabolism proved to be the predominant source of energy supplemented by anaerobic sources, mainly by high-energy phosphates at any level. Further should be stated that while physiological demands and energy costs differ between various levels of squash, a significant difference in energy contribution could not be observed, which emphasizes once more the high importance of aerobic endurance. With the exception of a large number of defeated errors in losing no significant differences between winners and losers could be observed. Moreover, squash players should maintain or strive for a good to top level of flexibility, capacity of reaction and (general) coordination plus an excellent level of squash-specific movement agility. The test battery allows us to discriminate between national and county players and the results can be used to make recommendations regarding the required level of performance at national level. Generally can be concluded that all findings, especially those of the energy demands and the key performance indicators of squash players, may potentially function as a guideline for optimized training programs in order to reach better results.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	VII
Tabellenverzeichnis	XIII
Abkürzungsverzeichnis	XVI
Symbolverzeichnis	XXVII
1 Einleitung	1
I Theoretischer Hintergrund	3
2 Squash	4
2.1 Entstehung der Sportart Squash	4
2.2 Die Spielidee	5
2.3 Die Zählweise	6
2.4 Das Spielfeld	6
2.5 Das Spielequipment	7
2.6 Aktionen im Squash	9
3 Anforderungsprofile in Sportsportarten	15
3.1 Belastung, Beanspruchung und Energiebereitstellung	17
3.2 Motorische Fähigkeiten	18
3.3 Wirkungsgefüge	24
4 Forschungsbedarf und Zielstellung	27
5 Forschungshintergrund und Arbeitshypothesen	32
5.1 Belastung im Squash	32
5.1.1 Hypothesen zur Belastung im Squash	40
5.2 Beanspruchung im Squash	40
5.2.1 Hypothesen zur Beanspruchung im Squash	44
5.3 Energiebereitstellung im Squash	45
5.3.1 Hypothesen zur Energiebereitstellung im Squash	47

5.4	Veränderungen im Spielverlauf im Squash	48
5.4.1	Hypothesen zu Veränderungen im Spielverlauf	49
5.5	Aerobe Leistungsfähigkeit im Squash	50
5.5.1	Hypothesen zur aeroben Leistungsfähigkeit Squash	52
5.6	Motorische Fähigkeiten im Squash	52
5.6.1	Hypothesen zur Fitness im Squash	57
6	Theoretischer Hintergrund zur Methodik	58
6.1	Erstellen eines physiologischen Anforderungsprofils	58
6.1.1	Leistungsphysiologische Parameter	62
6.2	Energiestoffwechsel	65
6.2.1	Anaerob alaktazider Energiestoffwechsel	67
6.2.2	Aerober Energiestoffwechsel	69
6.2.3	Anaerob laktazider Energiestoffwechsel	73
6.2.4	Energiebereitstellung in Abhängigkeit von Belastungsintensität und Belastungsdauer	75
6.2.5	Energiebereitstellung bei intermittierender Belastung	79
6.3	Berechnung der anteiligen Energiebereitstellung bei körperlicher Be- lastung	82
6.3.1	Berechnung der Energiebereitstellung des aeroben Energie- stoffwechsels	83
6.3.2	Berechnung der Energiebereitstellung des anaerob alaktazi- den Energiestoffwechsels	84
6.3.3	Berechnung der Energiebereitstellung des anaerob laktaziden Energiestoffwechsels	87
6.3.4	Berechnung der anteiligen Energiebereitstellung der aeroben und anaeroben Energiestoffwechsel	88
II	Methodik	89
7	Studiendesign	90
8	Probanden	91
8.1	Probanden der Hauptuntersuchung	91
8.2	Probanden der Nebenuntersuchung	91
9	Durchführung	92
10	Untersuchungsgeräte	94
10.1	Anthropometrische Messungen	94
10.2	Herzfrequenzmessung	94

10.3 Atemgasmessung	94
10.4 Blutlaktatkonzentrationsmessung	95
10.5 Erfassung des subjektiven Beanspruchungsempfindens	96
10.6 Laufbandergometer	97
10.7 Videoequipment und Videoanalysesoftware	97
10.8 Zeitmessung	97
11 Methodisches Vorgehen innerhalb der Hauptuntersuchung	98
11.1 Laufbandspiroergometrie	98
11.2 On-Court-Spiroergometrie	103
11.3 Videoanalyse	109
11.3.1 Zeitliches Belastungsprofil	109
11.3.2 Aktivitätsprofil	110
11.4 Erstellung des energetischen Profils Squash	114
11.4.1 Berechnung der aerob bereitgestellten Energiemenge	116
11.4.2 Berechnung der anaerob alaktazid bereitgestellten Energie- menge	117
11.4.3 Berechnung der anaerob laktazid bereitgestellten Energiemenge	122
12 Methodisches Vorgehen innerhalb der Nebenuntersuchung	124
12.1 Sportmotorische Testbatterie	124
12.1.1 Beweglichkeitstest	125
12.1.2 Reaktionsschnelligkeitstest	126
12.1.3 Koordinationstests	126
12.1.4 Agilitätstest	128
12.1.5 Schnelligkeitstest	129
12.1.6 Krafttests	129
12.1.7 Ausdauerleistungstest	132
13 Datenverarbeitung und Statistik	133
13.1 Datenverarbeitung	133
13.2 Statistik	135
III Ergebnisse	137
14 Anamnese	138
14.1 Anthropometrie Squash	138
14.1.1 Anthropometrie in Abhängigkeit des Spielniveaus	139
14.1.2 Anthropometrie von Gewinnern und Verlierern	141
14.1.3 Korrelationen Anthropometrie	141

15 Belastung im Squash	142
15.1 Zeitliche Belastungsstruktur Squash	142
15.1.1 Zeitliche Belastungsstruktur im Spielverlauf in Abhängigkeit des Spielniveaus	145
15.1.2 Zeitliche Belastungsstruktur in Abhängigkeit des Spielniveaus .	147
15.2 Aktivitätsprofil Squash	148
15.2.1 Bewegungsprofil	148
15.2.2 Schlagprofil	150
15.2.3 Nutzungsprofil der T-Zone	151
15.2.4 Aktivitätsprofil im Spielverlauf in Abhängigkeit von Spielniveau und Sieg und Niederlage	151
15.2.5 Aktivitätsprofil in Abhängigkeit des Spielniveaus	155
15.2.6 Aktivitätsprofil von Gewinnern und Verlierern	157
15.3 Korrelationen Belastung	158
16 Beanspruchung und Energiebereitstellung im Squash	159
16.1 Beanspruchung im Squash	159
16.1.1 Beanspruchung im Spielverlauf in Abhängigkeit vom Spielni- veau und Sieg und Niederlage	163
16.1.2 Beanspruchung in Abhängigkeit des Spielniveaus	165
16.1.3 Beanspruchung von Gewinnern und Verlierern	166
16.2 Korrelationen Beanspruchung	168
16.3 Energetisches Profil Squash	168
16.3.1 Energiebereitstellung im Spielverlauf in Abhängigkeit vom Spielniveau und Sieg und Niederlage	169
16.3.2 Energiebereitstellung in Abhängigkeit des Spielniveaus	170
16.3.3 Energiebereitstellung von Gewinnern und Verlierern	171
16.4 Modellerweiterung	172
16.5 Korrelationen und Unterschiede Energiebereitstellung	174
17 Körperliche Leistungsfähigkeit im Squash	176
17.1 Aerobe Leistungsfähigkeit Squash	176
17.1.1 Aerobe Leistungsfähigkeit in Abhängigkeit des Spielniveaus .	177
17.1.2 Aerobe Leistungsfähigkeit von Gewinnern und Verlierern . . .	180
17.2 Motorische Fähigkeiten Squash	180
17.2.1 Motorische Fähigkeiten in Abhängigkeit des Spielniveaus . . .	181
17.2.2 Motorische Fähigkeiten von Gewinnern und Verlierern	183
17.3 Korrelationen körperliche Leistungsfähigkeit	183
18 Wirkungsgefüge Squash	185
18.1 Spielstärke und Belastung	185

18.1.1	Haupteinflüsse	186
18.2	Belastung und metabolische Leistung	187
18.2.1	Haupteinflüsse	188
18.3	Metabolische Leistung und physische Ausbelastung	188
18.4	Körperliche Leistungsfähigkeit und physische Ausbelastung	189
18.4.1	Hauptuntersuchung	189
18.5	Belastung und physische Ausbelastung	189
18.6	Haupteinflüsse auf die physische Ausbelastung	190
18.7	Spielstärke und physische Ausbelastung	190
18.8	Körperliche Leistungsfähigkeit und metabolische Leistung	191
18.8.1	Hauptuntersuchung	191
18.8.2	Nebenuntersuchung	192
18.9	Spielstärke und körperliche Leistungsfähigkeit	192
18.9.1	Hauptuntersuchung	192
18.9.2	Nebenuntersuchung	194
19	Einflüsse auf die anteilige Energiebereitstellung	196
19.1	Belastung	196
19.1.1	Haupteinflüsse	196
19.2	Physische Ausbelastung	197
19.3	Haupteinflüsse Belastung und physische Ausbelastung	198
19.4	Körperliche Leistungsfähigkeit	199
19.4.1	Hauptuntersuchung	199
19.4.2	Nebenuntersuchung	200
20	Einflussgröße Alter	201
20.1	Alter und Spielstärke	201
20.1.1	Hauptuntersuchung	201
20.1.2	Nebenuntersuchung	201
20.2	Alter und körperliche Leistungsfähigkeit	202
20.2.1	Hauptuntersuchung	202
20.2.2	Nebenuntersuchung	202
IV	Diskussion	204
21	Methodenkritik	205
21.1	Stichprobe	205
21.2	Videoanalyse	206
21.3	On-Court-Spiroergometrie	206
21.4	Berechnung der anteiligen Energiebereitstellung	207

21.5 Laufbandspiroergometrie	210
21.6 Sportmotorische Testbatterie	212
21.7 Datenqualität	214
22 Diskussion der Ergebnisse	216
22.1 Anthropometrie Squash	216
22.2 Belastung im Squash	218
22.2.1 Zeitliche Belastungsstruktur	218
22.2.2 Aktivitätsprofil	220
22.3 Beanspruchung	227
22.4 Energiebereitstellung	232
22.5 Veränderungen im Spielverlauf	236
22.6 Körperliche Leistungsfähigkeit	239
22.6.1 Aerobe Leistungsfähigkeit	239
22.6.2 Motorische Fähigkeiten	242
22.7 Unterschiede zwischen Gewinnern und Verlierern	246
22.8 Vergleich mit anderen Sportarten	248
22.9 Wirkungsgefüge und Einflüsse auf die Energiebereitstellung	253
22.10 Trainingsempfehlungen	256
23 Fazit	259
23.1 Limitation	263
23.2 Ausblick	263
 Anhang	 i
A Berechnungs- und Beurteilungstabellen	ii
A.1 Tabellen zur Berechnung des energetischen Profils	ii
A.2 Formeln zur Normwertberechnung	iv
A.3 Normwerttabellen zur Beurteilung der Leistungen innerhalb der sport- motorischen Testbatterie	v
A.3.1 Normwerttabelle maximale Sauerstoffaufnahme	ix
B Einzelfallanalysen	xi
B.1 Verletzung des ersten Validitätskriteriums im Berechnungsmodell der Sauerstoffaufnahme der schnellen Komponente der EPOC	xi
C Technische Daten	xiii
C.1 Maße der Sit-and-Reach-Box	xiii
C.2 Maße der T-Schiene	xiii

Abbildungsverzeichnis

2.4.1	Aufbau eines Squashcourts (Offizielles Regelwerk DSQV, SRA, 2012, S. 25).	7
2.5.1	Sehr langsamer Squashball (Dunst, 2018).	8
2.5.2	Typischer Squashschläger mit Teardrop-Kopfform (Dunst, 2018).	9
2.6.1	Squashspieler bei Schlagausführung: Hinten (links) und vorne (rechts; Müller, 2013).	10
2.6.2	Squashspieler bei Schlagausführung: Vorhand (links) und Rückhand (rechts; Müller, 2013).	10
2.6.3	Idealisiertes Anlaufverhalten aus zentraler Position (Haymann & Me-seck, 1989, S. 18).	11
2.6.4	Exemplarische T-Zoneneinteilung nach Vučković et al. (2009). Der blaue Rahmen begrenzt den Bereich der T-Zone (Vučković et al., 2009, S. 867).	12
2.6.5	Squashspieler in Ballerwartungshaltung in zentraler T-Position: in Ball-erwartungshaltung (links) und beim Einnehmen oder Lösen dieser (rechts; Müller, 2013).	12
2.6.6	Squashspieler in Aktion: Ausfallschritt angesprungen (links) und tief (rechts; Müller, 2013).	13
2.6.7	Squashspieler in Aktion: im Richtungswechsel (links) und im Antritt (rechts; Müller, 2013).	14
2.6.8	Squashspieler in Aktion: seitlicher Volley in Courtmitte (links) und Vol-leyansatz über Kopf (rechts; Müller, 2013).	14
3.0.1	Komponenten der sportlichen Leistungsfähigkeit (Weineck, 2010, S. 25).	16
3.0.2	W.I.N.-Pyramide (Ribbecke, 2018).	16
3.2.1	Systematisierung der motorischen Fähigkeiten (Bös, 1987, S. 94).	19
3.2.2	Bestandteile der Agilität nach Sheppard & Young (Sheppard & Young, 2006, S. 922).	23
3.3.1	Wirkungsgefüge von Spielstärke bzw. Spielniveau, Belastung, Bean-spruchung, körperlicher Leistungsfähigkeit und (anteiliger) Energieebe-reitstellung.	25
3.3.2	Flussdiagramm Erhöhung der Spielstärke durch Steigerung der körper-lichen Leistungsfähigkeit.	25

3.3.3	Flussdiagramm Steigerung der körperlichen Leistungsfähigkeit durch Spielen auf erhöhtem Spielniveau.	26
6.1.1	Grundstruktur zur Auswahl sportmotorischer Testverfahren nach Bös (Oberger, 2014, S. 16).	61
6.2.1	Anordnung der Myofilamente im entspannten und kontrahierten Zustand (Rehner & Daniel, 2010, S. 523).	66
6.2.2	Zeitlicher Verlauf der alaktaziden Kapazität nach 6 – 8-sekündiger Sprintleistung (Janssen, 2003).	68
6.2.3	Schema der ATP-Resynthese per Glykolyse in der Muskelzelle (Heck, 2006, S. 24).	69
6.2.4	Schema des Citratzyklus in der Muskelzelle (Bannwarth et al., 2011, S. 409).	71
6.2.5	Schema der Atmungskette in der Muskelzelle (Gerber, 2013, S. 13). . .	72
6.2.6	Schema der Energiebereitstellung in der Muskelzelle (Löllgen et al., 2010, S. 214).	75
6.2.7	Kinetiken der muskulären Energiebereitstellung (Moosbacher, 2009, S. 15).	76
6.2.8	Schematische Darstellung des Sauerstoffdefizits (Weineck, 2010, S. 148). .	77
6.2.9	Laktatkinetik bei sukzessiver Belastungssteigerung (Löllgen et al., 2010, S. 17)	78
6.2.10	Verhalten respiratorischer und metabolischer Parameter bei sukzessiv ansteigender Belastung sowie Rekrutierung der Muskelfasern und dominant verstoffwechseltes Substrat (Löllgen et al., 2010, S. 15). . . .	79
6.2.11	Verhalten des respiratorischen Quotienten (hier RQ) während einer hoch intensiven Intervallbelastung von 4 mal 4 min (Wonisch et al., 2017, S. 295).	80
6.2.12	Verhalten der Blutlaktatkonzentration in Abhängigkeit von der Dauer der Belastungs- und Erholungsphasen bei hoch intensiven Intervallbelastungen (Wonisch et al., 2017, S. 294).	81
6.3.1	Graphische Veranschaulichung von Formel (6.3.2). $\dot{V}O_2(t)$ [$l \cdot min^{-1}$] beschreibt die aus den spiroergometrischen Messdaten interpolierte Sauerstoffaufnahme im Belastungszeitraum $[0, T]$. Die grau unterlegte Fläche entspricht dem Produkt aus durchschnittlicher Sauerstoffaufnahme ($\dot{V}O_2$ [$l \cdot min^{-1}$]) und Belastungsdauer (T [min]).	84

6.3.2	Graphische Darstellung der Abfallkinetik der Sauerstoffaufnahme in der Nachbelastung nach Knuttgen (1970). Die Funktionen $\dot{V}O_{2EPOC}(t)$, $\dot{V}O_{2FAST}(t)$ und $\dot{V}O_{2SLOW}(t)$ beschreiben die Gesamtsauerstoffaufnahme sowie die Sauerstoffaufnahme der schnellen und die der langsamen Komponente der Nachatmung zum Zeitpunkt t der Nachbelastung. $\dot{V}O_{2R}(t)$ entspricht der Sauerstoffaufnahme unter Ruhebedingungen ebenfalls zum Zeitpunkt t	85
7.0.1	Schematische Darstellung des Studiendesigns.	90
10.3.1	MetaMax® 3B-Paket (Cortex Biophysik GmbH 2014, S.14)	95
10.5.1	Borg-Skala (Löllgen, 2004, S. 299).	96
11.1.1	Belastungsphase innerhalb der Laufbandspiroergometrie (Müller, 2016).	98
11.1.2	Blutprobenentnahme in einer 30-sekündigen Belastungspause innerhalb der Laufbandspiroergometrie (Müller, 2016).	99
11.1.3	Untersuchungsequipment innerhalb der Laufbandspiroergometrie (Müller, 2016).	100
11.1.4	Belastungsprotokoll Laufbandspiroergometrie Squash mit Stufendauer D [min], Geschwindigkeit v [$m s^{-1}$], Steigung $grad$ [%] sowie Herzfrequenz HR , subjektive Beanspruchung RPE und Blutlaktatkonzentration BLC	100
11.1.5	Graphische Darstellung des Belastungsprotokolls der Laufbandspiroergometrie mit Belastungszeit t [min], Geschwindigkeit v [$m s^{-1}$] und Steigung $grad$ [%].	101
11.1.6	Exemplarischer Ergebnisbericht Laufbandspiroergometrie Squash.	103
11.2.1	Proband mit portablem Spiroergometriegerät mit Windshot und Pulsuhr mit Schrittzähler in der Probandenvorbereitung innerhalb der On-Court-Spiroergometrie (Müller, 2016).	104
11.2.2	Probanden während der Ruhemessung auf dem Court (Müller, 2016).	104
11.2.3	Probanden während des individuellen Warm-Ups auf dem Court (Müller, 2016).	105
11.2.4	Probanden im Spiel innerhalb der On-Court-Spiroergometrie (Müller, 2016).	106
11.2.5	Proband zu Beginn der Satzpause im Spiel innerhalb der On-Court-Spiroergometrie (Müller, 2016).	106
11.2.6	Probanden in der Sitzphase der Satzpause im Spiel innerhalb der On-Court-Spiroergometrie (Müller, 2016).	107
11.2.7	Probanden während der Ruhemessung in der 30-minütigen Nachbelastung auf dem Court (Müller, 2016).	107

11.2.8	Schematische Darstellung des Untersuchungsablaufs der On-Court-Spiroergometrie.	108
11.3.1	Adaptiertes Taggingpanel mit den verschiedenen Analyseblöcken zur Erstellung des Aktivitätsprofils.	112
11.4.1	Modell einer exemplarischen Phaseneinteilung der Sauerstoffaufnahme in der Satzpause mit initialer Gehphase (G), Sitzphase (S) und Warmspielphase (WS).	115
12.1.1	Start- und Endposition im Sit-and-Reach-Tests (Weiß, 2018).	125
12.1.2	Ablauf des Fallstabtests (Müller, 2015).	126
12.1.3	Grundposition der Einbeinstandtests (Weiß, 2018).	127
12.1.4	Aufbau des Change-of-Direction-Speed-Tests nach Wilkinson (Wilkinson et al., 2012, S. 543): die Kreise symbolisieren kleine, die Kreuze große Hütchen.	128
12.1.5	Aufbau des 30 m-Sprinttests (L=Lichtschränke, M=visuelle Marker). . .	129
12.1.6	Ablauf des Jump-and-Reach-Test (Weiß, 2018).	130
12.1.7	Stoßposition beim Medizinballstoßen (Müller, 2015).	131
12.1.8	Ablauf des Standweitsprungs von rechts nach links (Weiß, 2018). . . .	131
12.1.9	Aufbau des 20 m-Shuttle-Run-Tests (M=visuelle Marker).	132
14.1.1	Squasherfahrung und Trainingspensum der Probanden der Haupt- (HU) und Nebenuntersuchung (NU).	139
15.1.1	Häufigkeitsverteilung der Dauer der Ballwechsel.	142
15.1.2	Prozentuale Anteile sehr kurzer, kurzer, mittlerer und langer Ballwechsel.	143
15.1.3	Häufigkeitsverteilung der Anzahl der Schläge pro Ballwechsel.	143
15.1.4	Häufigkeitsverteilung der Dauer der Pausen zwischen den Ballwechseln.	144
15.1.5	Durchschnittliche Schlagfrequenz innerhalb der aktiven Spielzeit der einzelnen Sätze Squash national und Squash regional.	147
15.2.1	Prozentuale Anteile der verschiedenen maximal intensiven Aktionen. .	149
15.2.2	Vorhand- und Rückhandschläge in Prozent der Netto-Gesamtschläge. .	150
15.2.3	Netto-Gesamtschläge der einzelnen Sätze mit signifikantem Unterschied zwischen Satz 2 und Satz 3.	153
15.2.4	Vergleich des mittleren prozentualen Anteils vorne gespielter Bälle innerhalb der einzelnen Sätze Squash national und Squash regional. .	154
15.2.5	Durchschnittliche Anzahl der verschiedenen maximal intensiven Aktionen pro Satz Squash national und Squash regional.	156
15.2.6	Komponenten des Nutzungsprofils der T-Zone pro Satz Squash national und Squash regional.	157

16.1.1	Exemplarisches Verhalten der Sauerstoffaufnahme während der On-Court-Spiroergometrie. Ruhe (R), individuelles Warm-Up (WU), Einspielen (ES), Satz 1 (S1), Satz 2 (S2), Satz 3 (S3), Nachbelastungsphase(NB).	160
16.1.2	Exemplarisches Verhalten der Herzfrequenz während der On-Court-Spiroergometrie. Ruhe (R), individuelles Warm-Up (WU), Einspielen (ES), Satz 1 (S1), Satz 2 (S2), Satz 3 (S3), Nachbelastungsphase (NB).	160
16.1.3	Exemplarisches Verhalten der Blutlaktatkonzentration während der On-Court-Spiroergometrie. Ruhe (R), individuelles Warm-Up, (WU), Einspielen (ES), Satz 1 (S1), Satz 2 (S2), Satz 3 (S3), 3. Nachbelastungsminute (NB3).	161
16.1.4	Exemplarisches Verhalten des subjektiven Beanspruchungsempfindens während der On-Court-Spiroergometrie. Ruhe (R), individuelles Warm-Up, (WU), Einspielen (ES), Satz 1 (S1), Satz 2 (S2), Satz 3 (S3).	162
16.1.5	Durchschnittlicher RER der einzelnen Sätze Squash national und Squash regional.	165
16.3.1	Vergleich der anteiligen Energiebereitstellung der verschiedenen Energiestoffwechselwege der einzelnen Sätze.	169
16.3.2	Vergleich der anteiligen Energiebereitstellung Squash national und Squash regional.	171
16.3.3	Vergleich der Dauer der Sitzphasen der ersten und zweiten Satzpause Squash national und Squash regional.	171
16.4.1	Vergleich der anteiligen Energiebereitstellung der verschiedenen Energiestoffwechselwege in Prozent des Gesamtenergiebedarfs nach konservativer Berechnungsmethode (EP 1) und nach Stufe I der Modellerweiterung (EP 2).	173
17.1.1	Vergleich der testspezifischen relativen maximalen Sauerstoffaufnahme ($\dot{V}O_{2max}$ [$ml\ min^{-1}\ kg^{-1}$]) im Verhältnis zur Altersnorm nach Wassermann ($\% \dot{V}O_{2maxNorm}$) Squash national und Squash regional.	178
18.2.1	Zusammenhang zwischen der durchschnittlichen Rate an Laufaktionen pro Minute der aktiven Spielzeit (AR_{LERPT}) und der durchschnittlichen metabolischen Leistung (P_{TOT}).	188
18.8.1	Zusammenhang zwischen der relativen maximalen Sauerstoffaufnahme und der durchschnittlichen metabolischen Leistung (P_{TOT}).	191
18.8.2	Zusammenhang zwischen der Sauerstoffaufnahme bei einer Blutlaktatkonzentration von $4\ mmol\ l^{-1}$ ($rel\ \dot{V}O_{2BLC4}$) und der durchschnittlichen metabolischen Leistung (P_{TOT}).	192
18.9.1	Zusammenhang zwischen der Position im Expertenranking (Rang) und der relativen maximalen Sauerstoffaufnahme der Probanden im Laufbandstufentest ($rel\ \dot{V}O_{2max}$).	193

18.9.2	Zusammenhang zwischen der Position im Expertenranking (Rang) und der relativen Sauerstoffaufnahme der Probanden im Laufbandstufentest bei 4 mmol l^{-1} Blutlaktat ($\text{rel}\dot{\text{V}}\text{O}_{2\text{BLC4}}$).	194
20.1.1	Zusammenhang zwischen dem Alter und der Position im Expertenranking (Rang).	201
20.2.1	Zusammenhang zwischen dem Alter und der testspezifischen relativen maximalen Sauerstoffaufnahme der Probanden.	202
20.2.2	Zusammenhang zwischen dem Alter und der 30 m-Sprintzeit.	203
20.2.3	Zusammenhang zwischen dem Alter und der erreichten Zeit im EBSII.	203
22.6.1	Veränderungen der maximalen Sauerstoffaufnahme in Abhängigkeit von Alter und Geschlecht (Löllgen et al., 2010, S. 236).	240
A.3.1	Normwerttabelle Fallstabtest adaptiert nach Loosch (1999).	v
A.3.2	Normwerttabelle Sit-and-Reach-Test nach den ACSM's-Guidelines for Exercise Testing (2009), Teil A.	v
A.3.3	Normwerttabelle Sit-and-Reach-Test nach den ACSM's-Guidelines for Exercise Testing (2009), Teil B.	vi
A.3.4	Normwerttabelle Sit-and-Reach-Test nach dem Fitness and Lifestyle Research Institute in Canada (1983).	vi
A.3.5	Normwerttabelle für Männer nach Beck & Bös (1995).	vi
A.3.6	Normwerttabelle 30 m-Sprinttest nach Davis (2000).	vii
A.3.7	Normwerttabelle Jump-and-Reach-Tests nach Beck & Bös (1995).	vii
A.3.8	Normwerttabelle Standweitsprung nach Beck & Bös (1995).	viii
A.3.9	Normwerttabelle Medizinballstoßen (1kg) nach Beck & Bös (1995).	viii
A.3.10	Normwerttabellen maximale Sauerstoffaufnahme nach den ACSM's-Guidelines for Exercise Testing (2009).	x
C.1.1	Maße der innerhalb der Studie verwendeten Sit-and-Reach-Box.	xiii
C.2.1	Maße der innerhalb der Studie verwendeten T-Schiene.	xiii

Tabellenverzeichnis

5.1	Zeitliche Belastungsstruktur im Herrensquash.	34
5.2	Übersicht bisheriger Forschungsergebnisse zu ausgewählten Aspekten des Schlagprofils im Herrensquash	40
5.3	Forschungsergebnisse zur Beanspruchung im Herrensquash.	44
5.4	Energiebereitstellung in Racketsportarten.	47
5.5	Aerobe Leistungsfähigkeit im Herrensquash.	52
14.1	Darstellung und Vergleich von Alter, Körpergröße, Gewicht, BMI und Armspanne der Probanden der Haupt- (HU) und der Nebenuntersu- chung (NU).	138
14.2	Darstellung und Vergleich von Alter, Körpergröße, Gewicht, BMI und Armspanne Squash national und Squash regional (HU).	140
15.1	Darstellung der Häufigkeitsverteilung der primären Belastungsgrößen.	142
15.2	Zeitliche Belastungsstruktur pro Satz.	145
15.3	Vergleich der zeitlichen Belastungsstruktur der einzelnen Sätze.	146
15.4	Vergleich der mittleren Belastung im Herreneinzel Squash national und Squash regional.	148
15.5	Bewegungsprofil pro Satz.	149
15.6	Schlagprofil pro Satz.	150
15.7	Nutzungsprofil der T-Zone pro Satz.	151
15.8	Bewegungsprofil der einzelnen Sätze.	152
15.9	Nutzungsprofil der T-Zone der einzelnen Sätze.	155
15.10	Vergleich des Bewegungsprofils Squash national und Squash regional.	156
15.11	Vergleich der Nutzung der T-Zone Squash national und Squash regional.	157
16.1	Durchschnittliche Beanspruchung pro Satz.	163
16.2	Beanspruchung der einzelnen Sätze.	164
16.3	Beanspruchung der einzelnen Sätze prozentual zu den Maximalwerten sowie der Beanspruchung an den Laktatschwellen.	164
16.4	Vergleich der mittleren Beanspruchung pro Satz Squash national und Squash regional.	166
16.5	Vergleich der durchschnittlichen Beanspruchung von Gewinnern und Verlierern pro Satz Squash national.	167

16.6	Vergleich der durchschnittlichen Beanspruchung von Gewinnern und Verlierern pro Satz Squash regional.	167
16.7	Durchschnittliche Energiebereitstellung pro Satz.	168
16.8	Energiebereitstellung der einzelnen Sätze.	170
16.9	Vergleich der anteiligen Energiebereitstellung Squash national und Squash regional nach Modellerweiterung.	174
17.1	Maximale Leistung und physische Ausbelastung innerhalb des Laufbandstufentests.	176
17.2	Geschwindigkeit, Sauerstoffaufnahme und Herzfrequenz an der fixen aeroben und anaeroben Schwelle.	177
17.3	Vergleich von maximaler Geschwindigkeit, maximaler Sauerstoffaufnahme und maximaler Herzfrequenz Squash national und Squash regional.	177
17.4	Vergleich von Geschwindigkeit, Sauerstoffaufnahme und Herzfrequenz bei einer Blutlaktatkonzentration von 2 und 4 mmol l ⁻¹ Squash national und Squash regional.	179
17.5	Darstellung und Vergleich der Leistung und Beanspruchung an den Laktatschwellen prozentual zu den Maxima Squash national und Squash regional.	180
17.6	Ergebnisse der sportmotorischen Tests.	180
17.7	Ergebnisse der sportmotorischen Tests im Vergleich zur Norm.	181
17.8	Vergleich der Ergebnisse der sportmotorischen Testbatterie Squash national und Squash regional.	182
17.9	Ergebnisse der sportmotorischen Tests Squash national im Vergleich zur Norm.	183
17.10	Korrelationen der Ergebnisse der Einzeltests innerhalb der sportmotorischen Testbatterie.	184
18.1	Ergebnisse der Korrelationsanalyse der Belastungs- und Aktivitätsparameter und dem Ranglistenplatz im Expertenranking ($n = 22$).	186
18.2	Lineare Modellfunktion zur Erklärung der Abhängigkeit der Position im Expertenranking von den Belastungsparametern.	187
18.3	Lineare Modellfunktion zur Erklärung der Abhängigkeit der metabolischen Leistung von Belastungsparametern.	188
18.4	Ergebnisse der Korrelationsanalyse zwischen den Parametern der physischen Ausbelastung und der aeroben Leistungsfähigkeit ($n = 21$).	189
18.5	Lineare Modellfunktionen zur Erklärung der Abhängigkeit der physischen Ausbelastung von den Belastungsparametern, der metabolischen Leistung sowie den Parametern der aeroben Leistungsfähigkeit.	190
18.6	Korrelationen zwischen der Position im Expertenranking und den Ergebnissen innerhalb der sportmotorischen Tests ($n = 21$).	194

18.7	Lineares Modell zur Erklärung der Abhängigkeit der Spielstärke von einzelnen motorischen Fähigkeiten.	195
19.1	Korrelationen zwischen der anteiligen Energiebereitstellung und der Belastung unter Kontrolle des Einflusses der Spielstärke ($df = 19$). . .	196
19.2	Lineare Modellfunktion zur Erklärung der Abhängigkeit der Beteiligung des aeroben Energiestoffwechsels von Belastungsparametern.	197
19.3	Ergebnisse der partiellen Korrelationsanalyse zwischen den Parametern der physischen Ausbelastung und der anteiligen Energiebereitstellung ($df = 19$).	198
19.4	Lineare Modellfunktion zur Erklärung der Abhängigkeit der Beteiligung des aeroben Energiestoffwechsels von Belastungsparametern.	199
19.5	Ergebnisse der partiellen Korrelationsanalyse zwischen der aeroben Leistungsfähigkeit und der anteiligen Energiebereitstellung ($df = 19$). .	200
22.1	Aus den Ergebnissen der Studie abgeleitete Normwerte für die einzelnen sportmotorischen Tests Squash.	246
22.2	Ausgewählte Forschungsergebnisse zu Beanspruchung und aerober Leistungsfähigkeit im Tennis, Tischtennis und Badminton.	249
22.3	Ausgewählte Forschungsergebnisse zur zeitlichen Belastungsstruktur im Tennis, Tischtennis und Badminton.	249
A.1	Kalorisches Äquivalent in Abhängigkeit des respiratorischen Quotientens. . .	ii
A.2	Grenzwerte der Sauerstoffaufnahme zur Rephosphorylierung von Kreatinphosphat in der Nachbelastung.	iii

Abkürzungsverzeichnis

a	Amplitude der schnellen Komponente der EPOC
a_p	Amplitude der schnellen Komponente der EPOC in der Satzpause P
A	Phase leichter Aktivität in der Satzpause
ADP	Adenosindiphosphat
A_{LE}	Laufaktionen, Aktionen der unteren Extremitäten (engl.: <i>actions of the lower extremities</i>)
A_{max}	Aktionen maximaler Intensität
AO	Australian Open
apm	Aktionen pro Minute (engl.: <i>actions per minute</i>)
$AR_{RPT_{LE}}$	Laufaktionen pro Minute der aktiven Spielzeit (engl.: <i>actionrate of the lower extremities within real playing time</i>)
$AR_{RPT_{max}}$	Aktionen maximaler Intensität pro Minute der aktiven Spielzeit (engl.: <i>rate of maximum actions within real playing time</i>)
$AR_{TPT_{LE}}$	Laufaktionen pro Minute der Gesamtspielzeit (engl.: <i>actionrate of the lower extremities within total playing time</i>)
$AR_{TPT_{max}}$	Aktionen maximaler Intensität pro Minute der Gesamtspielzeit

	(engl.: <i>rate of maximum actions within total playing time</i>)
ATP	Adenosintriphosphat
BACK	prozentualer Anteil der Schläge hinter der horizontalen T-Linie (engl.: <i>back</i>)
BF	Atemfrequenz (engl.: <i>breathing frequency</i>)
BH	prozentualer Anteil der Rückhandschläge (engl.: <i>backhand</i>)
BLC	Blutlaktatkonzentration
BLC _{max}	maximale Blutlaktatkonzentration
BLC _{NB_k}	Blutlaktatkonzentration in der k-ten Nachbelastungsminute
BLC _{NB_{max}}	Maximum der Blutlaktatkonzentration in den ersten 15 min der Nachbelastungsphase
BLC _{P_i}	Blutlaktatkonzentration in der i-ten Pause
BLC _{P_iEND}	Blutlaktatkonzentration am Ende der i-ten Pause
BLC _{P_n}	Maximum der Blutlaktatkonzentration in den ersten 15 min der Nachbelastungsphase
BLC _{P₀}	Blutlaktatkonzentration nach dem Einspielen
BLC _R	Blutlaktatkonzentration in Ruhe
BLC(t)	Blutlaktatkonzentration zum Zeitpunkt t
BMI	Body Mass Index

bpm	Schläge pro Minute (engl.: <i>beats per minute</i>)
brpm	Atemzüge pro Minute (engl.: <i>breaths per minute</i>)
CDS	Change-of-Direction-Speed-Test
D	Dauer (engl.: <i>duration</i>)
DR	Dauer der Ballwechsel (engl.: <i>duration of rallies</i>)
DSQV	Deutscher Squash Verband e.V.
DT	zurückgelegte Distanz (engl.: <i>distance travelled</i>)
EBSI	Einbeinstand I
EBSII	Einbeinstand II
EPOC	Sauerstoffaufnahme der Nachatmung nach Belastungsende (engl.: <i>Excess Post Exercise Oxygen Consumption</i>)
EPT	effektive Spielzeit (engl.: <i>effective playing time</i>)
ERR	Relation aus Belastung und Pause (engl.: <i>exercise-to-rest-ratio</i>)
FH	prozentualer Anteil der Vorhandschläge (engl.: <i>forehand</i>)
FMS	Functional Movement Screen

FRONT	prozentualer Anteil der Schläge vor der horizontalen T-Linie (engl.: <i>front</i>)
FT	Fallstabtest
FTO	Fast-Twitch-Oxidativ
G	Gehphase in der Satzpause
grad	Steigung (engl.: <i>gradient</i>)
GTP	Guanintriphosphat
HR	Herzfrequenz (engl.: <i>heart rate</i>)
HR _{BLC2}	Herzfrequenz bei 2 mmol l ⁻¹ Blutlaktat
HR _{BLC4}	Herzfrequenz bei 4 mmol l ⁻¹ Blutlaktat
HR _{max}	(testspezifische) maximale Herzfrequenz
%HR _{max}	Herzfrequenz in Prozent der maximalen Herzfrequenz
%HR _{maxNorm}	maximale Herzfrequenz in Relation zur Altersnorm
HRV	Herzratenvariabilität
HU	Hauptuntersuchung
JR	Jump-and-Reach-Test
kum.	kumuliert
kum. Standzeit T	Summe aller Standzeiten innerhalb der T-Zone

LR	Anzahl langer Ballwechsel (engl.: <i>long rallies</i>)
MR	Anzahl mittellanger Ballwechsel (engl.: <i>medium rallies</i>)
MSR	20 m-Shuttle-Run-Test (engl.: <i>multiple shuttle run</i>)
MS	Medizinballstoßen
nat.	national
NU	Nebenuntersuchung
O ₂ LÄ	O ₂ -Laktat-Äquivalent
P	Anzahl der erzielten Punkten (engl.: <i>points</i>)
P _{AER}	aerobe metabolische Leistung
P _{BLC}	anaerob laktazide metabolische Leistung
P _i	i-te Satzpause
POS	Point-on-serve Zählweise
P _{PCr}	anaerob alaktazide metabolische Leistung
PPR	Point-per-rally Zählweise
P _{TOT}	metabolische Leistung
PSA	Professional Squash Association
Rang	Ranglistenplatz im Expertenranking
R	Anzahl der Ballwechsel

	(engl.: <i>rallies</i>)
reg.	regional
rel $\dot{V}O_{2BLC2}$	relative Sauerstoffaufnahme bei 2 und mmol l ⁻¹ Blutlaktat
rel $\dot{V}O_{2BLC4}$	relative Sauerstoffaufnahme bei 4 und mmol l ⁻¹ Blutlaktat
rel $\dot{V}O_{2max}$	relative maximale Sauerstoffaufnahme
RER	respiratorischer Quotient (engl.: <i>respiratory exchange ratio</i>)
RER _{max}	(testspezifischer) maximaler respiratorischer Quotient
RPE	subjektives Beanspruchungsempfinden (engl.: <i>rating of perceived exertion</i>)
RPT	aktive Spielzeit (engl.: <i>real playing time</i>)
RT	Pause zwischen den Ballwechseln (engl.: <i>rest time between rallies</i>)
S	Sitzphase in der Satzpause (energetisches Profil), Anzahl der Schläge pro Ballwechsel (engl.: <i>shots per rally</i> , Belastungsprofil)
s	Startzeitpunkt
SF _{RPT}	Schlagfrequenz in der aktiven Spielzeit (engl.: <i>shots per minute of real playing time</i>)
SF _{TPT}	Schlagfrequenz in der (Netto-)Gesamtspielzeit (engl.: <i>shots per minute of total playing time</i>)
Sidesteps	Sidesteps in Prozent der Laufaktionen

spm	Schläge pro Minute (engl.: <i>shots per minute</i>)
spr	Schläge pro Ballwechsel (engl.: <i>shots per rally</i>)
Sprint	Sprinttest
SR	Sit-and-Reach-Test (sportmotorische Testbatte- rie), Anzahl kurzer Ballwechsel (engl.: <i>short rallies</i> , zeitliche Belastungsstruktur)
Standzeitpunkte	Erreichen der T-Zone mit Einnahme der Baller- wartungshaltung
Standzeit T	durchschnittliche Dauer der Ballerwartungshal- tung innerhalb der T-Zone
Steps	Schritte in Prozent der Laufaktionen
STJ	Standweitsprung (engl.: <i>standing jump</i>)
T	Endzeitpunkt
T erreicht	Erreichen der T-Zone vor Ausführung des gegne- rischen Schlages
TE	Trainingserfahrung
t_i	i-ter Zeitpunkt
TPT	(Netto-)Gesamtspielzeit (engl.: <i>total playing time</i>)
TS	Gesamtzahl der Schläge (engl.: <i>total shots</i>)

TS_{NET}	Gesamtzahl der Einzelschläge exklusive der Aufschläge (engl.: <i>single total shots serves excluded</i>)
v	Geschwindigkeit (engl.: <i>velocity</i>)
v_{BLC2}	Geschwindigkeit bei 2 mmol l ⁻¹ Blutlaktat
v_{BLC4}	Geschwindigkeit bei 4 mmol l ⁻¹ Blutlaktat
$\dot{V}E$	Atemminutenvolumen
$\dot{V}E/\dot{V}O_{2max}$	maximales Atemäquivalent für O ₂
VIF	Varianzinflationsfaktor
VK	Variabilitätskoeffizient
v_{max}	maximale Geschwindigkeit
% v_{max}	Geschwindigkeit in Prozent der maximalen Geschwindigkeit
Volley	prozentualer Anteil der Volleyschläge
$\dot{V}O_2$	Sauerstoffaufnahme
VO_{2EPOC}	Sauerstoffaufnahme der EPOC
$VO_{2EPOC_{GUS}}$	Sauerstoffaufnahme der EPOC innerhalb der Satzpause bis zur Warmspielphase
VO_{2Fast}	Sauerstoffaufnahme der schnellen Komponente der EPOC
$\dot{V}O_{2max}$	maximale Sauerstoffaufnahme
$\dot{V}O_{2R}$	Sauerstoffaufnahme in Ruhe

$\dot{V}O_{2NET}$	Nettosauerstoffaufnahme
$\dot{V}O_{2P}$	Sauerstoffaufnahme in der Satzpause P
$\dot{V}O_{2PCr}$	Sauerstoffaufnahme zur Rephosphorylierung von Kreatinphosphat
$\dot{V}O_{2PCrG}$	Sauerstoffaufnahme zur Rephosphorylierung von Kreatinphosphat in der initialen Gehphase G der Satzpause
$\dot{V}O_{2PCrP}^*$	Sauerstoffaufnahme zur Rephosphorylierung von Kreatinphosphat in Satzpause P unter Berücksichtigung der initialen Gehphase
$\dot{V}O_{2PCrS}$	Sauerstoffaufnahme zur Rephosphorylierung von Kreatinphosphat in der Sitzphase S der Satzpause
$\dot{V}O_{2PCrP_{Norm}}$	berechnetes physiologisches Maximum für die Sauerstoffaufnahme zur Kreatinphosphatrephosphorylierung
$\dot{V}O_{2PCrP_{TOT}}$	Sauerstoffaufnahme der schnellen Komponente bei vollständiger EPOC
$\dot{V}O_{2RCP}$	Sauerstoffaufnahme am respiratorischen Kompensationspunkt
$\dot{V}O_{2Slow}$	Sauerstoffaufnahme der langsamen Komponente der EPOC
$\% \dot{V}O_{2max}$	Sauerstoffaufnahme in Prozent der maximalen Sauerstoffaufnahme
$\% \dot{V}O_{2max_{Norm}}$	maximale Sauerstoffaufnahme in Relation zur Altersnorm
$\dot{V}O_{2WS}$	Sauerstoffaufnahme in der Warmspielphase der Satzpause

VSR	Anzahl sehr kurzer Ballwechsel (engl.: <i>very short rallies</i>)
$\dot{V}T$	Atemzugvolumen
$v\dot{V}O_{2\max}$	Geschwindigkeit bei $\dot{V}O_{2\max}$
W_{AER}	aerobe Energiemenge
W_{ANAER}	anaerobe Energiemenge
WB	Wimbledon
W_{BLC}	anaerob laktazide Energiemenge
W_{PCR}	anaerob alaktazide Energiemenge
W_{TOT}	Gesamtenergiemenge
$\%W_{\text{AER}}$	aerober Energieanteil
$\%W_{\text{ANAER}}$	anaerober Energieanteil
$\%W_{\text{BLC}}$	anaerob laktazider Energieanteil
$\%W_{\text{PCR}}$	anaerob alaktazider Energieanteil
WSF	World Squash Federation
ΔBLC	Nettoblutlaktatproduktion
ΔBLC_i	Nettoblutlaktatproduktion des i-ten Satzes
$\Delta^+\text{BLC}$	durchschnittliche Blutlaktatelimination während eines Satzes
τ_a	Zeitkonstante der schnellen Komponente der EPOC

τ_b

Zeitkonstante der langsamen Komponente der
EPOC

Zeitkonstante der Laktatelimination

Symbolverzeichnis

\mathbb{R}	Menge der reellen Zahlen
\mathbb{R}^+	Menge der positiven reellen Zahlen
$:=$	definiert als
$=$	gleich
$\leq, <$	kleiner oder gleich, kleiner
$\geq, >$	größer oder gleich, größer
\cup	Vereinigung
$\sum_{i=1}^n a_i$	$a_1 + \cdots + a_n$
\Rightarrow, \rightarrow	Implikation
$\Leftrightarrow, \leftrightarrow$	Äquivalenz
\in	Element von
\subset, \subseteq	echte Teilmenge von, Teilmenge von
$[a, b]$	abgeschlossenes Intervall von $a \in \mathbb{R}$ bis $b \in \mathbb{R}$
$\{a, b, c\}$	Menge mit den Elementen a, b, c
\max	Maximum, maximiere
\min	Minimum, minimiere
$\int_{t_1}^{t_2}$	Integral von t_1 bis t_2

Essentially, all models are
wrong, but some are useful.

*(Der britische Mathematiker
Georg Edward Pelham Box)*

1 Einleitung

Squash ist eine Indoor-Rückschlagsportart, bei der im Gegensatz zu den anderen Rückschlagspielen nicht aus gegenüberliegenden Spielfeldern über ein Netz gespielt wird, sondern beide Gegenspieler (oder Gegenspielerpaare) in einem gemeinsamen dreidimensionalen Spielraum einen in etwa golfballgroßen Ball mit Schlägern abwechselnd gegen eine Spielwand (Frontwand) schlagen (Prenz, 2012). Gemessen an der Zahl aktiver Spieler ist Squash neben Tennis, Badminton und Tischtennis eine der vier großen Racketsportarten. Mit Ballgeschwindigkeiten von bis zu mehr als 250 km h^{-1} gehört Squash zu den schnellsten Rückschlagsportarten überhaupt (Chapman & Zuyderhoff, 1986; Fritz, 2009).

Betrachtet man das Squashgeschehen auf internationalem Niveau sind derzeit Ägypten, England, Australien und Frankreich die führenden Nationen. Im internationalen Vergleich nimmt Deutschland momentan Weltranglistenplatz neun ein. International konnten bisher kaum wichtige Titel gewonnen werden. So stellt sich die Frage, worin der Vorsprung der führenden Nationen im Vergleich zu den deutschen Topspielern begründet ist. Zum einen mangelt es auf Grund der Tatsache, dass Squash derzeit nicht olympisch und in Deutschland weniger prestigeträchtig als in den führenden Nationen ist, an Finanzierungskraft, um beispielsweise die Förderung junger Talente oder die Professionalisierung bereits etablierter deutscher Spieler zu subventionieren. Zum anderen scheinen die führenden Nationen insbesondere einen unmittelbaren physiologischen Leistungsvorsprung vor den deutschen Spielern zu haben. Nach Meinung des Bundestrainers Oliver Pettke wurden in der Vergangenheit viele Spiele auf internationalem Niveau nicht auf Grund technischer oder taktischer Mängel, sondern häufig wegen fehlender Kondition verloren. Dies führte er zum Teil darauf zurück, dass innerhalb des Deutschen Squash Verbandes (DSQV) keine Infrastruktur existiert, die es zulässt, Trainingsinhalte institutional vorzugeben, das Training durch Leistungsstützpunkte zu zentralisieren und regelmäßige Leistungskontrollen durchzuführen. Darüber hinaus herrscht hinsichtlich der Entwicklung und Verbesserung der körperlichen Leistungsfähigkeit im Squash in Ermangelung der Kenntnis spielleistungsrelevanter Größen bisweilen große Verunsicherung über die konkreten Inhalte der Trainingslehre. Bisherige Orientierungshilfen basieren zum größten Teil auf aus Erfahrungswerten und Expertenmeinungen abgeleiteten Mutmaßungen sowie vereinzelten wissenschaftlichen Erkenntnissen. Da die bisherigen Forschungsergebnisse jedoch vorwiegend aus den 70er, 80er und 90er Jahren des vorherigen Jahrhunderts stammen und 2009 als Konsequenz einer Intervention zur Steigerung der Attraktivität der Sportart für den Zuschauer weltweit das Reglement verändert wurde, erscheint die wissenschaftliche Datenlage aktuell nicht mehr repräsentativ. Um die bestehende

Verunsicherung zu beheben, ist es demnach nach dem Vorbild anderer Sportarten notwendig, genaue leistungsphysiologische Erkenntnisse zu den aktuellen Anforderungen der Sportart zu erlangen, darauf basierend wesentlichen Komponenten der sportartspezifischen Leistungsfähigkeit zu identifizieren und die zielgerichtete Verbesserung dieser mit den Mitteln der Trainingslehre in der Trainingspraxis zu realisieren.

„All sports have benefitted from, and need sports science and squash is no exception.“
(Malcom Willstrop, erfolgreicher Squashtrainer)

„The best players in the world take the physiological science and use it to guide their training patterns [. . .]“ (Dave Pearson, ehemaliger Nationaltrainer Englands)

Das Ziel dieser Arbeit ist somit die Erstellung eines aktuellen (leistungs-) physiologischen Anforderungsprofils der Sportart Squash, dessen Kenntnis einen Beitrag zum grundsätzlichen Verständnis der Sportart leisten und darüber hinaus durch Betrachtung verschiedener Spielniveaus dazu dienen kann, wichtige Größen zu identifizieren, die für den Übergang in eine höhere Spielklasse bzw. vom Junioren- in den Seniorenbereich von besonderer Bedeutung sind. Letzteres scheint gerade mit Blick auf eine erfolgreiche internationale Zukunft des Deutschen Squashverbandes von besonderem Interesse zu sein.

Aus der formulierten Zielsetzung ergibt sich der Aufbau dieser Arbeit:

Zum grundsätzlichen Verständnis werden im ersten Teil zunächst die wesentlichen Merkmale der Sportart Squash beschrieben (s. Kapitel 2). Um den Gegenstand dieser Arbeit nachfolgend zu konkretisieren, wird anschließend der Begriff des physiologischen Anforderungsprofils unter Berücksichtigung des Sportsportartcharakters von Squash für diese Arbeit definiert und dessen einzelne Komponenten näher beschrieben (s. Kapitel 3). Vor diesem Hintergrund wird in den Kapiteln 4 und 5 auf der Basis der bisherigen Datenlage im Squash der aktuelle Forschungsbedarf diesbezüglich aufgezeigt, die Forschungsschwerpunkte definiert und durch die Formulierung von Arbeitshypothesen konkretisiert. Vor Darstellung des Studiendesigns wird zunächst der zum Verständnis von Methodik und Ergebnisinterpretation benötigte theoretische Hintergrund erläutert (s. Kapitel 6). Im zweiten Teil der Arbeit wird die Methodik der Untersuchungen, Datenerhebung und statistischen Auswertung präzisiert. Nach der Ergebnispräsentation im dritten Teil erfolgt im vierten Teil zunächst die Bewertung des methodischen Vorgehens (s. Kapitel 21) sowie anschließend die Diskussion der Ergebnisse dieser Arbeit (s. Kapitel 22). Basierend auf den wesentlichen Erkenntnissen wird abschließend ein aktuelles physiologisches Anforderungsprofil formuliert und daraus abgeleitet Trainingsempfehlungen skizziert.

Teil I

Theoretischer Hintergrund

2 Squash

2.1 Entstehung der Sportart Squash

Die ersten Überlieferungen eines squashähnlichen Rückschlagspiels stammen aus dem alten Ägypten. Bei sämtlichen Urformen des Squashs wurde der Ball bis zur Erfindung des Schlägers am Ende des 15. Jahrhunderts mit der Hand geschlagen, wobei ab dem 12. Jahrhundert auf Grund der Beschaffenheit der schweren zunächst mit Kork oder Hundehaar gefüllten und mit Leder umspannten Bälle zur Unterstützung der Schlagfläche an der Innenseite mit Holz verstärkte Handschuhe getragen wurden (Zug, 2003). Als direkter Vorläufer des Squashs gilt das bis in das späte 18. Jahrhundert in England gespielte Wandspiel Fives, das je nach Überlieferung in Mönchs- oder Gefängniszellen entstand sein soll und dessen Spielfeld mit seinen abfallenden Seitenwänden bereits große Ähnlichkeit zum heutigen Squashcourt aufwies. Anfang des 19. Jahrhunderts wurde Squash in der englischen Harrow School gespielt. Als Teil des Aufwärmprogramms vor den Open Court Rackets wurde sich mit einem weichen Gummiball auf einem aus zwei im rechten Winkel zueinander stehenden Wänden bestehenden Racket-Court eingespielt. Dem Spiel mit einem weichen, sich beim Schlagen zusammenquetschenden Ball entstammt auch der Name Squash (engl.: *zerquetschen*). Im Jahre 1890 wird Squash erstmalig als eigene Sportart in der Sportliteratur erwähnt. Jedoch existieren vorerst keine festen Regeln, so dass vor allem die Courtgröße und Ballbeschaffenheit stark variieren. Mitte des 19. Jahrhunderts verbreitete sich Squash hauptsächlich durch Schüler und Studenten ausgehend von England zunächst im Commonwealth und gelangte anschließend nach Nordamerika. Nachdem Squash 1908 einmalig olympische Disziplin war, wurde 1926 das erste offizielle Regelwerk von Charles Arnold herausgebracht und vier Jahre später mit der Squash Rackets Association (SRA) der erste eigene Sportverband gegründet (Zug, 2003). Obwohl in Deutschland die ersten Squashcourts bereits in den 1930er Jahren errichtet wurden, wurde Squash initial lediglich als Betriebssport von den Mitarbeitern von Siemens und von den Piloten des Deutschen Luftfahrt-Verbandes als Fitness- und Freizeitsport betrieben. Durch die Geschehnisse des zweiten Weltkrieges geriet Squash vollständig in Vergessenheit. Zu dieser Zeit wurden die vorhandenen Squashcourts zum Beispiel als Lagerräume zweckentfremdet (Prenz, 2012). Erst in den 1970er Jahren wurde die Sportart hierzulande wiederentdeckt und gewann nach und nach an Popularität. In den 1980er Jahren erlebte die Sportart einen regelrechten Boom, in dessen Folge ein Anstieg der Squashcourts von 20 im Jahr 1975 auf über 1000 im Jahr 1990 mit über 2 Millionen aktiven Spielern und 600.000 Vereinsspielern zu verzeichnen war (Haymann & Meseck, 1989; Deutscher Squash-Racket-Verband, 2004). Trotz eines leichten Rückgangs an Squashcourts

und aktiven Spielern ab 2005 in Deutschland ist weltweit ein weiteres Wachstum mit zunehmender Ausdehnung auf beispielsweise osteuropäische Länder zu beobachten. Bei über 15 Millionen aktiven Spielern weltweit ist die Zahl dieser international aktuell in England, den USA und Australien am höchsten (Eime & Finch, 2002; Prenz 2012). Im internationalen Vergleich belegte Deutschland bei der letzten Team-WM 2017 in Marseilles den 9. Platz. Das Weltmeisterteam kam aus Ägypten gefolgt von England, Australien und Hong-Kong. Trotz großen Ambitionen und vielfacher Bewerbung ist Squash momentan kein Teil des olympischen Programms.

2.2 Die Spielidee

Im Gegensatz zu Tennis, Badminton und Tischtennis, bei welchen die gegnerischen Spieler durch ein Netz voneinander getrennt auf unterschiedlichen Hälften des Spielfeldes agieren, bewegen sich die Spieler im Squash in ein und demselben durch vier Wände begrenzten Spielraum. Innerhalb des Spielraumes ist das reguläre Spielfeld durch rote Linien markiert (s. Abbildung 6.2.9). Nach regulärem Aufschlag wird der Ball abwechselnd von beiden Spielern so mit dem Schläger gespielt, dass er ohne den Boden zu berühren, aber unter potentielltem Einbezug des regulären Spielfeldes der übrigen Wände die Frontwand zwischen oberer und unterer Auslinie erreicht. Anschließend darf der Ball maximal einmal den Boden berühren, bevor dieser vom gegnerischen Spieler erneut an die Frontwand gespielt werden muss. Ziel ist es, den Ball so zu spielen, dass der gegnerische Spieler den Ball nicht mehr erreicht, bevor dieser den Boden ein zweites Mal berührt, oder es diesem nicht mehr möglich ist, einen regulären Schlag auszuführen. Zwischen zwei Sätzen wird national 90 s und international eine Pause von 120 s gemacht, in der es den Spielern gestattet ist, den Court zu verlassen. Die letzten 15 s einer Pause werden vom Schiedsrichter angesagt, so dass sich die Spieler für die Wiederaufnahme des Spiels bereitmachen können. Zu Beginn eines jeden Satzes ist ein kurzes Warmspielen des Balles gestattet. Für den Wechsel von Ausrüstung kann von Seiten des Schiedsrichters zusätzlich Zeit eingeräumt werden. Nach dem ersten Aufschlag muss ein möglichst unterbrechungsarmes Spielen gewährleistet werden. Da das Agieren von minimal zwei Spielern in einem gemeinsamen Spielraum darüber hinaus ein enormes Verletzungspotential birgt, existieren bestimmte Regeln, um einen flüssigen Ablauf zu ermöglichen und gefährlichen Situationen vorzubeugen. Dabei gilt grundsätzlich, dass der Ball ungehindert an jeden Punkt der Frontwand geschlagen werden können muss. Gefährdet ein Spieler beispielsweise durch zu ausladende Aushol- oder Schlagbewegungen oder durch Wegversperren den anderen, so wird der Ballwechsel gegen ihn gewertet. Behindern sich die Spieler im Court gegenseitig oder besteht die Gefahr, den Gegner bei Ausführung des Schlages zu verletzen, kommt es zu einem Letball¹.

¹Eine ausführliche Darstellung aller Regeln gibt das offizielle Regelwerk des DSQV.

2.3 Die Zählweise

Gespielt werden drei Gewinnsätze. Im Maximum werden somit fünf Sätze gespielt. Dabei gewinnt der Spieler einen Satz, der als erster 11 Punkte erreicht. Bei einem Punktestand von 10:10 wird ein Tie-Break gespielt und es gewinnt derjenige, der als erster einen Punkteabstand von zwei Punkten erreicht. Jeder Ballwechsel führt unabhängig vom Aufschlagrecht zum Punktgewinn, wobei Let-Entscheidungen eine Nullwertung mit anschließender Wiederholung des Ballwechsels zur Folge haben. Diese Point-per-rally Zählweise (PPR 11) gilt offiziell seit dem 1. April 2009 weltweit in allen Spielklassen. In der ursprünglichen Zählweise (Point-on-serve, POS 9) konnten Punkte nur nach eigenem Aufschlag erzielt werden. Darüber hinaus war ein Satz bei maximal 10 Gewinnpunkten beendet. Bei einem Punktestand von 8:8 entschied der Rückschläger des Aufschlages, ob der Satz bei 9 oder 10 Punkten beendet werden sollte. Bis zur flächendeckenden Einführung von PPR 11 war dies außer im Profibereich die offizielle Zählweise. Im Profibereich wurde stattdessen bereits seit 1996 mit der PPR 15 Zählweise gespielt und 2004 auf die PPR 11 Zählweise umgestellt (Murray et al., 2014). Auch bei der PPR 15 Zählweise führte jeder Ballwechsel unabhängig vom Aufschlagrecht zum Punktgewinn. Im Gegensatz zu PPR 11 wurde jedoch regulär bis 15 gespielt. Wie bei der POS 9 entschied der Rückschläger bei einem Spielstand von 14:14, ob der Satz bis 15 oder 17 gespielt werden sollte.

2.4 Das Spielfeld

Ein Squashcourt ist in der Regel ca. 9,75 m lang und ca. 6,40 m breit. Die obere Auslinie befindet sich auf der Frontwand in einer Höhe von 4,57 m, die Aufschlaglinie befindet sich 1,83 m über dem Boden. Nach unten wird das Spielfeld der Frontwand durch eine Auslinie begrenzt, unter der sich das sogenannte Tin-Board oder Brett befindet. Dieses reicht vom Boden in der Regel bis auf eine Höhe von 0,48 m, bei Weltranglistenturnieren der Herren von 0,43 m, und dient zur leichteren Identifizierung der akustischen Untermalung von Ausbällen. Das Spielfeld ist darüber hinaus an den Seitenwänden sowie der Rückwand durch eine obere Auslinie begrenzt. Die Auslinien der Seitenwände verbinden die Auslinie der Frontwand mit der der Rückwand, welche sich 2,13 m oberhalb des Bodens befindet. Alle Auslinien sind 5 cm breit, rot und konkav gebogen, damit der Ball bei Berührung sichtbar verspringt (Prenz, 2012). Der horizontale Teil der sogenannten Ts, welches durch die Querlinie und Mittellinie gebildet wird, trennt den Court in einen ca. 5,49 m langen vorderen Teil (FRONT) und einen mit 4,26 m Länge um ca. 1 m kürzeren hinteren Teil (BACK). Durch den vertikalen Teil des Ts wird der hintere Teil des Courts darüber hinaus in ein rechtes und ein linkes hinteres Platzviertel unterteilt, in welchen sich jeweils ein Aufschlagviereck befindet. Diese Courtunterteilung ist lediglich beim Aufschlag relevant. Der

Boden eines Squashcourts ist ein Schwingboden klassisch bestehend aus nicht versiegeltem, aber gut abgeschliffenen Holzparkett. Die Front- und Seitenwände bestehen aus speziell beschichteten Beton oder Mauerwerk, die Rückwand in der Regel aus massivem Glas. Um den Sport für den Zuschauer attraktiver zu gestalten, werden bei internationalen Turnieren zunehmend Glascourts eingesetzt, deren Seitenwände aus Glas bestehen. Die das Spielfeld begrenzenden Linien sind allesamt 50 mm breit und im Idealfall leicht gewölbt, so dass der Ball bei Berührung der nicht zum regulären Spielfeld gehörenden Linien deutlich verspringt (Haymann & Meseck, 1989). In Abbildung 2.4.1 ist das seitliche Profil eines Squashcourts mit offiziellen Spielfeldmaßen dargestellt.

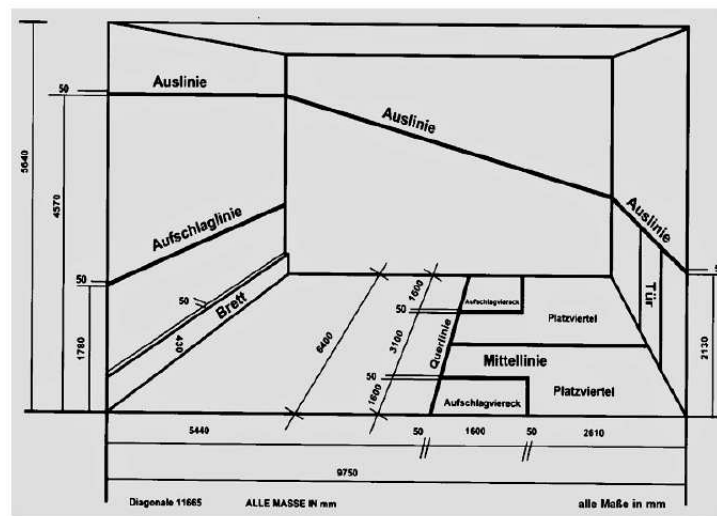


Abbildung 2.4.1: Aufbau eines Squashcourts (Offizielles Regelwerk DSQV, SRA, 2012, S. 25).

2.5 Das Spielequipment

Neben möglichst leichten, atmungsaktiven Hallenschuhen mit heller, griffiger Sohle und ausreichend Bewegungsfreiheit gewährender, möglichst schweißaufnehmender Sportbekleidung gehören Bälle und Schläger zum Spielequipment im Squash. Gespielt wird mit einem aus einer speziellen Kautschuk- oder Gummimischung bestehenden Ball mit einem Durchmesser von $4 \pm 0,5$ cm und einem Gewicht von 24 ± 1 g (WSF). Dieser ist mit einem Tropfen Flüssiggas gefüllt, so dass nach Warmspielen des Balles ein Überdruck entsteht, der dem Ball seine Sprungfähigkeit verleiht (Prenz, 2012). Je nach exakter Größe und Zusammensetzung sind unterschiedlich hohe Balltemperaturen zum Entfalten der Sprungfähigkeit erforderlich. So erreichen schnelle Bälle bereits bei Temperaturen von 23° ihre Sprungfähigkeit, während langsame Bällen zur vollständigen Entfaltung ihrer spezifischen Sprungfähigkeit auf 45° erwärmt werden müssen. Da die Temperatur des Balles mit der Spielzeit und insbesondere der Schlaghärte zunimmt, werden schnelle Bälle im Anfänger- und langsame Bälle im

Fortgeschrittenenbereich verwendet. Durch spezifische farbliche Markierung lassen sich schnelle (blaue), mittlere (rote), langsame (weißer Punkt), sehr langsame (gelber Punkt) und sehr, sehr langsame Bälle (zwei gelbe Punkte) voneinander unterscheiden (Offizielles Regelwerk DSQV, SRA, 2012). In Abbildung 2.5.1 ist exemplarisch ein sehr langsamer Squashball dargestellt.



Abbildung 2.5.1: Sehr langsamer Squashball (Dunst, 2018).

Die in der Regel mit 1,1 – 1,3 mm starken Kunstfasersaiten mit einer Härte von bis zu 12 – 14 kg bespannten Schläger sind in ihrer Größe genormt. Der Rahmen der Squashschläger besteht für gewöhnlich aus mit Kohlefasern (Karbon, Graphit, Boron, Kelvar etc.) oder Fiberglas verstärktem Kunststoff oder Aluminiumlegierungen und kann innerhalb der Norm in seiner Form zwischen oval und rund in den Grundtypen teardrop, klassisch und gestrecktes Herz variieren. Die Griffe der Schläger sind entweder mit Frottee- oder lederähnlichen Kunststoffbändern umwickelt, um einen festen Griff zu gewährleisten (Prenz, 2012). Abbildung 2.5.2 zeigt exemplarisch einen typischen Squashschläger mit Teardrop-Kopfform.



Abbildung 2.5.2: Typischer Squashschläger mit Teardrop-Kopfform (Dunst, 2018).

2.6 Aktionen im Squash

Wie in allen Sportspielen dient im Squash jedes sportliche Handeln im Sinne einer Aktion dem Zweck, ein aus der Spielidee und den Spielregeln resultierendes übergeordnetes taktisches Ziel zu realisieren, welches im Squash in dem Erzielen eines Punktes besteht. Dabei sind die sich einem Spieler offerierenden Handlungsoptionen zur Zielerreichung abhängig von der aktuellen Spielsituation (Position auf dem Court, Stellung zum Ball, Flugverhalten des Balles etc.) sowie den individuellen Voraussetzungen desjenigen (Anthropometrie, Kondition, Technik, Taktik, Motivation, Spielintelligenz) (Haymann & Meseck, 1989). Basierend auf der den individuellen Entscheidungshandlungen übergeordneten Grundtaktik im Squash, aus der zentralen Mitte agierend sich in eine möglichst günstige Schlagposition zu bringen und nach ausgeführten Schlag möglichst schnell zur zentralen Mitte zurückzukehren, lassen sich die Aktionen während eines Squashspiels in vier Kategorien einteilen: Schläge, Bewegungen zur Fortbewegung auf dem Court (Laufbewegungen), Auftaktbewegungen und finale Bewegungen zum Ball. Eine allgemeine Einteilung der Schläge kann anhand der Position im Court bei Schlagausführung getrennt durch die horizontale T-Linie in Schläge im vorderen Bereich und Schläge im hinteren Bereich des Courts (s. Abbildung 2.6.1) und auf Grundlage der verwendeten Schlägerseite bei Treffen des Balls in Vorhand- und Rückhandschläge erfolgen (s. Abbildung 2.6.2). Daneben werden verschiedene Schlagtechniken unterschieden (Longline, Cross, Boast, Stopp, Lob, Volley). Da die Schlagtechnikauswahl jedoch vor dem Hintergrund der Thematik dieser Arbeit als nicht bedeutsam zu bewerten ist, wird auf eine weitere Darstellung einzelner Schlagtechniken verzichtet und auf Haymann & Meseck (1989) verwiesen.



Abbildung 2.6.1: Squashspieler bei Schlagaussführung: Hinten (links) und vorne (rechts; Müller, 2013).



Abbildung 2.6.2: Squashspieler bei Schlagaussführung: Vorhand (links) und Rückhand (rechts; Müller, 2013).

Je nach Schlagtechnik und Schlagposition sowie der Zeitspanne, die ein Spieler von der ersten Reaktion auf den Schlag des Gegners bis zum Erreichen des Balles bzw. nach Schlagen des Balles bis zum Erreichen der situativ zentralen Mitte zur Verfügung hat, können unterschiedliche Lauftechniken beobachtet werden. Dabei lassen sich prinzipiell Schritte und Sidesteps unterscheiden. Neben Aspekten wie beispielsweise der Spielerfahrung erfolgt die Auswahl situativ adäquater Lauftechniken vordergründig unter den Gesichtspunkten Zeitgewinn (direkter Weg mit möglichst wenigen Bewegungen) und Anstrengungsreduktion (möglichst wenig Bewegungen maximaler Intensität). Im Folgenden soll dies unabhängig von der geläufigen leistungsphysiologischen vom Wirkungsgrad dominierten Definition als Bewegungsökonomie bezeichnet werden. Dabei sollte im Squash der Ball trotz scheinbar kürzester Strecke im Idealfall nicht direkt angelaufen, sondern von der zentralen Mitte aus zunächst die Strecken vorwärts bzw. rückwärts in der Nähe der Courtmitte zurückgelegt und anschließend

die seitlichen Abstände zum Ball bewältigt werden (Haymann & Meseck, 1989). Abbildung 2.6.3 veranschaulicht die Bewegungsmuster aus zentraler Position zu exemplarischen Balltreffpunkten.

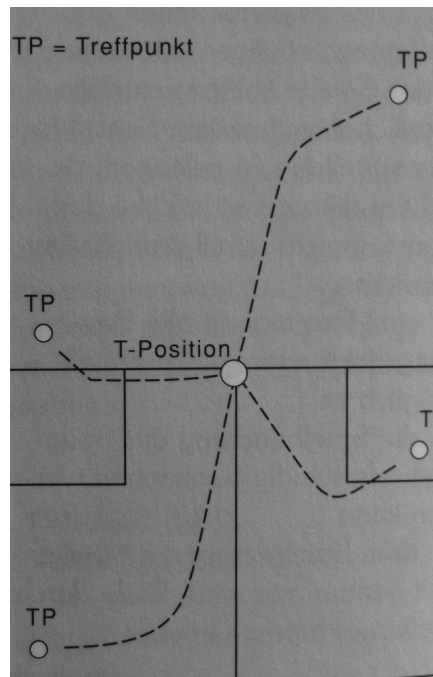


Abbildung 2.6.3: Idealisiertes Anlaufverhalten aus zentraler Position (Haymann & Meseck, 1989, S. 18).

Nach Ausführung des Schlages gilt es, unter ständiger Beobachtung des Balles möglichst schnell die zentrale Position zu erreichen und dort die Grundstellung einzunehmen, um eine möglichst hohe Anzahl von Handlungsoptionen sowie eine möglichst hohe Handlungsbereitschaft zu generieren. Die zentrale Position im Squash wird als T-Position innerhalb der T-Zone bezeichnet, welche sich als ca. 4 m^2 großes Quadrat um das T darstellt, dessen Lokalisation und Größe jedoch je nach Definition variieren. Je nach antizipierter Flugbahn des Balles kann die T-Position jedoch zentral oder leicht versetzt zum T innerhalb der T-Zone sein, so dass diese auch als situative T-Position bezeichnet wird. Abbildung 2.6.4 zeigt das Areal der T-Zone.

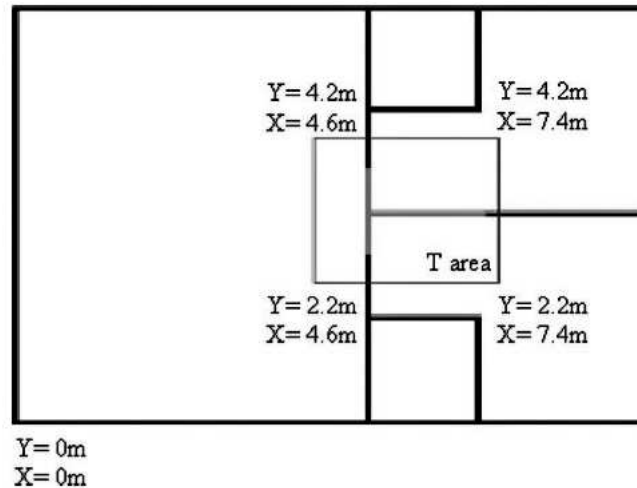


Abbildung 2.6.4: Exemplarische T-Zoneneinteilung nach Vučković et al. (2009). Der blaue Rahmen begrenzt den Bereich der T-Zone (Vučković et al., 2009, S. 867).

Von der zentralen T-Position aus ist es dem Spieler möglich, die Ecken des Courts annähernd gleich schnell zu erreichen sowie die Spielhandlung des Gegners und den Ball stets zu beobachten. Darüber hinaus wird durch diese ein Spielen durch die Courtmitte unterbunden (Haymann & Meseck, 1989). Um sich aus der T-Position ohne Zeitverlust in alle Richtungen bewegen zu können, nimmt der Spieler, falls möglich, die sogenannte Ballerwartungshaltung ein (s. Abbildung 2.6.5). Dieser in der Regel etwas mehr als schulterbreite Stand mit leicht gebeugten Knien und gleichmäßiger Gewichtsverteilung auf beiden Fußballen gewährleistet eine möglichst hohe Bewegungsbereitschaft und lässt sich in vergleichbarer Form auch in anderen Sportarten wie beispielsweise Badminton finden (Kempter, 2008). Der Schläger wird in Ballerwartungshaltung vor dem Körper idealerweise in etwa auf Hüfthöhe gehalten.



Abbildung 2.6.5: Squashspieler in Ballerwartungshaltung in zentraler T-Position: in Ballerwartungshaltung (links) und beim Einnehmen oder Lösen dieser (rechts; Müller, 2013).

Auch in Ballerwartungshaltung ist der Blick stets auf den Ball und die Aufmerksamkeit auf das Handeln des Gegners gerichtet. Die Ballerwartungshaltung wird häufig durch einen Auftaktschritt eingeleitet, die Landung erfolgt breitbeinig. Muskulär wird so ein Zustand der Vorspannung erreicht (Kempter, 2008). Die Ballerwartungshaltung wird oftmals durch einen Auftaktsprung, den sogenannten Split-Jump gelöst.

Die finale Bewegung zum Ball ist maßgeblich durch die Funktionen geprägt, die (Vorwärts-)Bewegung des Körpers abzustoppen, eine sichere Basis zur Schlagausführung zu gewährleisten sowie den Abstand zum Ball möglichst effizient zu verkürzen, und erfolgt in den meisten Fällen in Form eines Ausfallschrittes (Kuntze et al., 2010). Ausnahmen hierzu bilden Schläge, die mit extremer Oberkörperrotation aus dem hinteren Halbfeld des Courts gespielt werden. Hier wird der Schlag im Parallelstand ausgeführt (Haymann & Meseck, 1989).

Ein wesentliches Mittel zur Zielerreichung besteht im Squash darin, durch geeignete Schlagauswahl einen möglichst hohen Druck auf den Gegner auszuüben, der sich für diesen als Zeitdruck äußert. In Folge eines hohen Zeitdrucks lassen sich Antritte, sehr tiefe Ausfallschritte und abrupte Richtungswechsel beobachten. Mittel zum Druckausüben können Volleyschläge und Schläge ins vordere Halbfeld darstellen (s. Abbildung 2.6.6, 2.6.7 und 2.6.8).

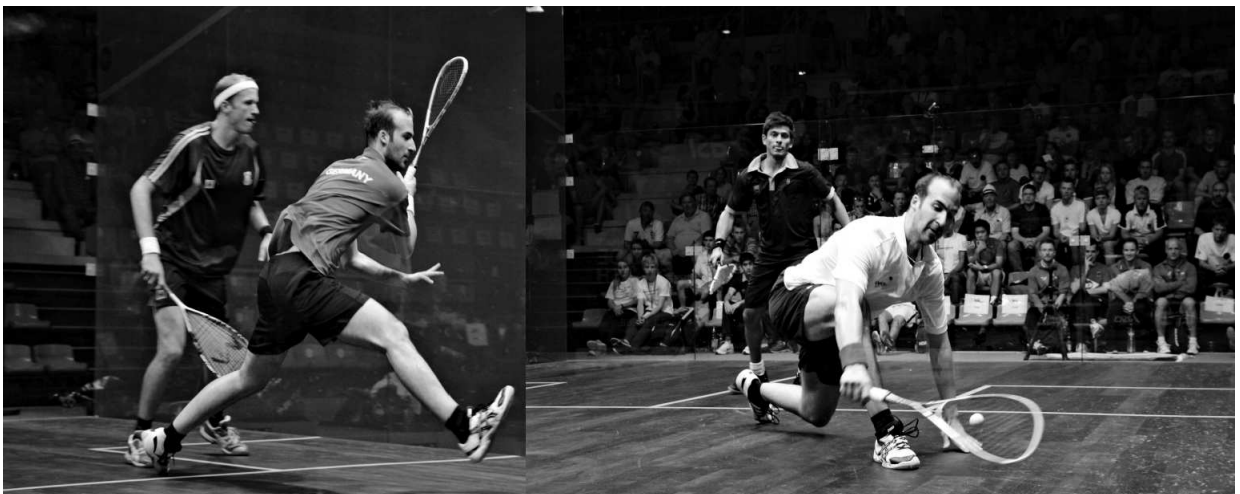


Abbildung 2.6.6: Squashspieler in Aktion: Ausfallschritt angesprungen (links) und tief (rechts; Müller, 2013).



Abbildung 2.6.7: Squashspieler in Aktion: im Richtungswechsel (links) und im Antritt (rechts; Müller, 2013).



Abbildung 2.6.8: Squashspieler in Aktion: seitlicher Volley in Courtmitte (links) und Volleyansatz über Kopf (rechts; Müller, 2013).

3 Anforderungsprofile in Sportsportarten

Jede Sportart besitzt ihre eigenen Voraussetzungen für Erfolg, welche aus der Struktur und den Bedingungen der jeweiligen Sportart sowie den sich daraus ergebenden Anforderungen an die Sportler resultieren. Werden diese nach Analyse der Anforderungen einer Sportart durch, um diesen genügen zu können, notwendige oder wünschenswerte Attribute konkretisiert, so spricht man von einem Anforderungsprofil (Norton & Olds, 2001). Jeder ein Sportspiel in Wettkämpfen betreibende Spieler hat erfahrungsbasiert eine Vorstellung davon, was das jeweilige Wettkampfspiel ausmacht und welche Anforderungen das Spiel somit an die Leistungsfähigkeit und insbesondere die körperliche Leistungsfähigkeit stellt (Haymann & Meseck, 1989). Dabei können die Aussagen über die zentralen Anforderungen in Abhängigkeit des Geschlechts, der Altersklassen, des Spielniveaus, der Spielstärke, des Spielertyps oder aber der Position variieren. Dennoch lässt sich basierend auf dem Querschnitt aller Erfahrungen und Expertenmeinungen das Anforderungsprofil einer Sportart bereits skizzieren, welches jedoch erst unter Einbezug sportwissenschaftlicher respektive leistungsphysiologischer Erkenntnisse konkretisiert werden kann.

Das Anforderungsprofil einer Sportsportart enthält primär die Leistungsfaktoren, die für das Erbringen einer Spilleistung erforderlich sind und aus dem Wirkungsgefüge verschiedener spieltypischer Aspekte resultieren. Wie in anderen Sportarten auch setzt sich die Leistungsfähigkeit in Sportspielen aus unterschiedlichen Komponenten zusammen. Dabei können anthropometrische Aspekte wie die Körpergröße und -konstitution ebenso eine Rolle spielen wie technische und taktischer Fertigkeiten, körperliche Fähigkeiten und die mentale Stärke (Meseck et al., 2003). In der Literatur existieren verschiedenen Modelle, die versuchen, die einzelnen Bestandteile der sportlichen Leistungsfähigkeit zu systematisieren. Eines der bekanntesten Modelle ist das in Abbildung 3.0.1 dargestellte Modell der sportlichen Leistungsfähigkeit nach Weineck (2010).

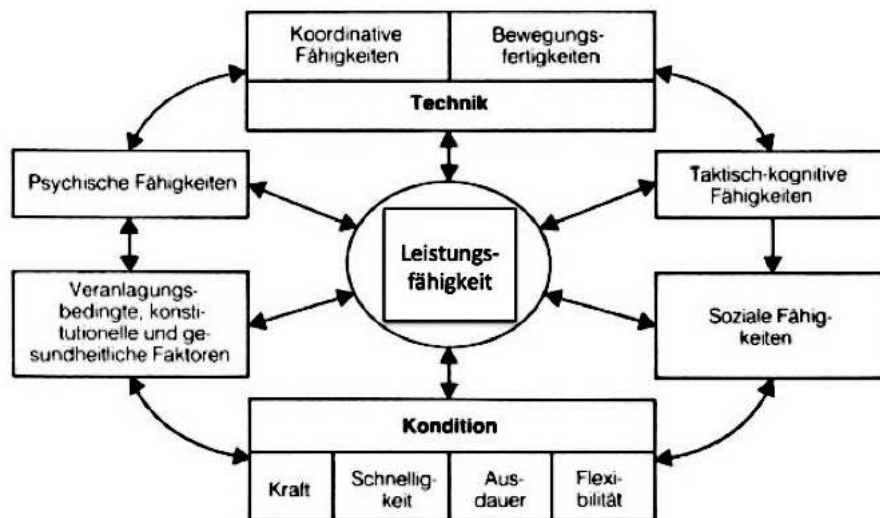


Abbildung 3.0.1: Komponenten der sportlichen Leistungsfähigkeit (Weineck, 2010, S. 25).

Anknüpfend an eine solche Systematisierung der einzelnen Bestandteile der sportlichen Leistungsfähigkeit versucht das auf Gerrit Keferstein und Stefan Adler zurückgehende W.I.N.-Modell (W.I.N.: *what's important now*) die einzelnen Komponenten dieser in Form einer Pyramide zu hierarchisieren, um so ein Bedingungsgefüge zu kreieren, was eine sinnvolle Strukturierung der verschiedenen Komponenten der sportlichen Leistungsfähigkeit und darauf basierend der Trainingsinhalte ermöglicht. Zusätzlich bietet sich durch diesen Systematisierungsansatz im Gegensatz zu vorherigen Modellen erstmalig die Möglichkeit, durch das Aufzeigen von Causalzusammenhängen Defizite auf einer Ebene auf Defizite auf einer der vorgeschalteten Ebenen zurückzuführen. Abbildung 3.0.2 zeigt das Modell der W.I.N.-Pyramide.



Abbildung 3.0.2: W.I.N.-Pyramide (Ribbecke, 2018).

Das physiologische Anforderungsprofil einer Sportsportart beschreibt dabei konkret die körperlichen Voraussetzungen im Sinne des Ausprägungsgrades verschiedener Komponenten der körperlichen Leistungsfähigkeit, die für das Erbringen einer (spiel-niveauadäquaten) Spielleistung erforderlich oder wünschenswert sind. Diese können in Abbildung 3.0.2 den Ebenen der Bewegungseffizienz, Energiesysteme und der Kraftentfaltung zugeordnet werden. Die in einer Sportsportart zu erbringende Spielleistung kann aus physiologischer Perspektive durch das spezifische Wirkungsgefüge von Belastung, Beanspruchung und Energiebereitstellung beschrieben und die aus diesem resultierenden Anforderungen an die körperliche Leistungsfähigkeit durch den spezifischen Ausprägungsgrad motorischer Fähigkeiten konkretisiert werden.

3.1 Belastung, Beanspruchung und Energiebereitstellung

In Anlehnung an die Definitionen von Rohmert (1984) kann inhaltlich eine strikte Trennung zwischen Belastung und Beanspruchung getroffen werden. Demzufolge werden unter Belastung die exogenen Anforderungen im Sinne einer vom Individuum unabhängigen, vorgegeben (physikalischen) Leistung verstanden, die sich aus der spezifischen Konstellation der einzelnen Belastungsnormativa Intensität, Dauer, Dichte, Umfang und Komplexität ergeben und sich durch physikalische Messgrößen beschreiben lassen. Da in vielen Sportspielen bislang aus technischen Gründen eine Messung der tatsächlichen physikalischen Belastung im Wettkampf nur schwer möglich ist, wird diese üblicherweise über die zeitliche Belastungsstruktur (äußerer Belastungsstruktur: Dauer, Dichte, Umfang) beschrieben und durch die Aktivitätsstruktur der Spieler (innere Belastungsstruktur: Komplexität, Intensität) ergänzt.

Beanspruchung meint jede von Funktionszustand und Wirkungsgrad abhängige individuelle endogene Reaktion des Organismus auf eine Belastung, welche durch physiologische Parameter beschrieben wird und die Aspekte körperliche Leistung (metabolische Leistung) und Anstrengung (physischen Ausbelastung) umfasst (Bussweiler, 2014). Als indirekter physiologischer Parameter für die körperliche respektive die metabolische Leistung dient in der Leistungsphysiologie und Sportmedizin die Sauerstoffaufnahme ($\dot{V}O_2$), aus welcher sich in vielen Fällen der Energiebedarf sowie der Energieumsatz als direkte physiologische Leistungsparameter abschätzen lassen (s. Kapitel 6.3). Physiologische Parameter wie die Herzfrequenz, die Blutlaktatkonzentration sowie respiratorische Parameter wie die Atemfrequenz, Ventilation und Kohlendioxidabgabe ermöglichen darüber hinaus vor dem Hintergrund ihrer absoluten oder relativen Extrema eine differenziertere Leistungsbeschreibung sowie eine Bewertung der physischen Ausbelastung beim Erbringen dieser Leistung. Der Grad der physischen Ausbelastung während einer Belastung in Prozent der jeweiligen Leistungsmaxima wird in der Praxis auch dazu verwendet, die Belastungsintensität

zur Konkretisierung der physiologischen Anforderungen zu beschreiben oder innerhalb der Trainingssteuerung als Zielgröße vorzugeben.

Aus leistungsphysiologischer Sicht ist im Kontext der Ableitung sinnvoller Trainingsinterventionen darüber hinaus die Beteiligung der verschiedenen Energiestoffwechsel an der Energiebereitstellung während einer sportlichen Belastung von besonderem Interesse (s. Kapitel 6.2). Da die Beteiligung dieser vom Organismus in Abhängigkeit der zu erbringenden Leistung bedarfsgerecht reguliert wird, können so einerseits weitere Erkenntnisse über die physiologischen Anforderungen einer Sportart gewonnen und andererseits in Konsequenz die Bedeutung der Leistungsfähigkeit und der Kapazität einzelnen Energiestoffwechsel hinsichtlich der sportartspezifischen körperlichen Leistungsfähigkeit bewertet werden.

3.2 Motorische Fähigkeiten

Unter motorischen Fähigkeiten werden allgemeine Kompetenzen verstanden, die das zum Lösen verschiedener motorischer Aufgaben erforderliche Niveau von Steuerungsprozessen und energetischen Funktionsprozessen beschreiben (Roth & Willimezik, 1999). Diese lassen sich nach dem fähigkeitsorientierten Ansatz nach Bös (1987) in energetisch determinierte konditionelle Fähigkeiten sowie informationsorientierte koordinative Fähigkeiten unterteilen, in Abhängigkeit der Belastungsnormativa in weitere Subkategorien untergliedern und unter dem Begriff der Fitness zusammenfassen. Die Beweglichkeit kann als personale Leistungsvoraussetzung der passiven Systeme der Energieübertragung nach Bös weder den konditionellen noch den koordinativen Fähigkeiten eindeutig zugeordnet werden (Banzer et al., 2004). Abbildung 3.2.1 zeigt die Einteilung der motorischen Fähigkeiten nach Bös (1987).

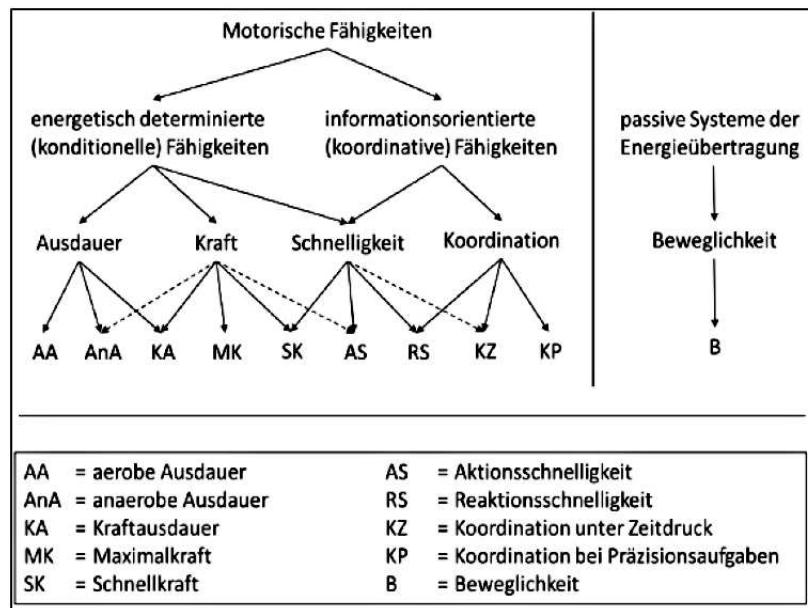


Abbildung 3.2.1: Systematisierung der motorischen Fähigkeiten (Bös, 1987, S. 94).

Nach dieser Einteilung sowie der Hierarchisierung im W.I.N.-Modell als den konditionellen Fähigkeiten übergeordnet kann die von der Leistungsfähigkeit des Atmungs- und Herzkreislaufsystems, von Umfang und Struktur der Skelettmuskulatur und von intra- und interzellulärer metabolischer Funktionsfähigkeit abhängigen Leistungsfähigkeit der verschiedenen Energiestoffwechsels verstanden werden (Heck & Schulz, 2002). In diesem Kontext unterscheidet man je nach aus der Belastungsintensität und -dauer resultierender Dominanz der Energiestoffwechsel zwischen aerober und anaerober Leistungsfähigkeit und Kapazität (s. Kapitel 6.2). Als das Bruttokriterium der aeroben Leistungsfähigkeit gilt in der leistungsdiagnostischen sowie der klinischen Praxis die maximale Sauerstoffaufnahme ($\dot{V}O_{2max}$), welche als alters-, geschlechts- und trainingszustand- abhängige Größe die Leistungsfähigkeit von Atmungssystem, Herzkreislaufsystem und Energiestoffwechsel vereint (Kroidl et al., 2007). Nach Hollman et al. (2006) ist sie als die maximale Menge an Sauerstoff definiert, die bei dynamischer Arbeit großer Muskelgruppen pro Minute aufgenommen werden kann. Diese ist zu einem Großteil genetisch determiniert und nur zu 20 – 50 % trainierbar. Die aerobe Leistungsfähigkeit ist jedoch auch von der Höhe des Anteils der maximalen Sauerstoffaufnahme abhängig, die über einen längeren Zeitraum zur Verfügung steht, dessen Limit durch die anaerobe Schwelle definiert ist. Diese ist mit 50 – 70 % im Vergleich zur maximalen Sauerstoffaufnahme vergleichsweise gut trainierbar (Moosburger, 1994).

Die anaerobe Leistungsfähigkeit entspricht der maximalen Energieflussrate der anaeroben Energiestoffwechsel. Sie ist insbesondere abhängig von der Verteilung und Rekrutierung der Muskelfasern und der Enzymaktivität (Sander, 2015). In einigen Sportarten wird die Leistungsfähigkeit darüber hinaus auch durch die Kapazität einzelner Energiestoffwechsel bestimmt, die der Summe aller aus chemisch gespeicherten

Energieträgern gewinnbaren Arbeitsbeiträge entspricht (Heck & Schulz, 2002).

Die Leistungsfähigkeit der energieliefernden Systeme determiniert den Ausprägungsgrad der verschiedenen konditionellen Fähigkeiten und kann im Kontext von Ermüdung auch die Leistungsfähigkeit bezüglich koordinativer Fähigkeiten beeinflussen. So werden reine Schnelligkeits- und Kraftleistungen maßgeblich durch die anaerobe Leistungsfähigkeit und Kapazität determiniert, wohingegen Leistungen mit Dauer- oder Wiederholungscharakter ab einem gewissen Zeitpunkt primär durch die aerobe Leistungsfähigkeit bestimmt werden.

Unter Ausdauer im Kontext sportlicher Leistung versteht man die psychophysische Widerstandsfähigkeit gegen Ermüdungen bei länger anhaltenden Belastungen, sowie die schnelle Wiederherstellungsfähigkeit innerhalb einer Belastungspause bzw. nach Belastungsende. Die Einteilung der Ausdauer kann neben der bereits erwähnten Differenzierung nach Art der Energiebereitstellung (aerobe und anaerobe Ausdauer) nach Belastungsdauer (Kurzzeit-, Mittelzeit-, Langzeitausdauer (I-IV)), Menge der beteiligten Muskulatur (lokale und allgemeine Ausdauer) und Art der Arbeitsweise (statisch und dynamisch) erfolgen (Weineck, 2010). Darüber hinaus kann im Kontext der Sportartspezifität eine weitere Differenzierung in allgemeine und spezielle Ausdauer vorgenommen werden. Während die allgemeine Ausdauer vor allem die aerobe Leistungsfähigkeit meint, wird unter der speziellen Ausdauer die Fähigkeit zum Erbringen höchster sportartspezifischer Ausdauerleistungen verstanden (Martin et al., 2001). Die Charakteristika einer Sportart definieren auch die Anforderungen an die spezifische Ausdauerleistungsfähigkeit der Spieler. Dabei bestimmt die Unterscheidung in zyklische oder azyklische Bewegungsabläufe, kontinuierliche oder intervallartige Belastungen, hohe oder niedrige Krafteinsätze, hohe oder niedrige Bewegungsgeschwindigkeiten und das Maß an erforderlicher Konzentration die Form der für die Sportart benötigten Ausdauer (Rehagel, 2011).

Physikalisch betrachtet ist Kraft das Produkt aus Masse und Beschleunigung und somit aus Masse und Geschwindigkeit pro Zeiteinheit, woraus ein unmittelbarer Zusammenhang von Kraft und Geschwindigkeit resultiert. Im Kontext sportlicher Leistung meint Kraft die Fähigkeit des neuromuskulären Systems, Widerstände durch willkürliche Muskelkontraktion zu überwinden bzw. äußeren Kräften entgegenwirken zu können (Schnabel et. al., 2003). Die Basisform der Kraft ist die Maximalkraft, die als größtmögliche Kraft definiert ist, die über einen bestimmten Arbeitsweg bewältigt (konzentrisch, exzentrisch) oder gegen einen Widerstand erzeugt (isometrisch) werden kann. Hinsichtlich ihrer Beziehung zu anderen motorischen Fähigkeiten lässt sich die Maximalkraft klassisch in die Subkategorien Schnellkraft und Kraftausdauer unterteilen, welche mittlerweile durch die Reaktivkraft als exzentrisch-konzentrische Schnellkraft bei möglichst kurzer Kopplung beider Arbeitsphasen als eigenständige

Kraftform Ergänzung findet (Weineck, 2010). Die Schnellkraft beschreibt die Fähigkeit des neuromuskulären Systems, in der zur Verfügung stehenden Zeit einen möglichst großen Impuls zu erzeugen. Dabei kann es im Sport beispielsweise darum gehen, einem Gegenstand eine möglichst hohe Endgeschwindigkeit zu verleihen oder aber eine Bewegung in einer möglichst geringen Zeit auszuführen. Eine wichtige Erscheinungsform der Schnellkraft ist die Explosivkraft. Diese ist bei besonders kurzen Belastungsphasen von Bedeutung und meint die Fähigkeit eines möglichst schnellen Kraftanstiegs, der bei einer maximal schnellen Kontraktion gegen einen statischen Widerstand erzeugt wird. Ist es hingegen Ziel, eine bestimmte Kraftleistung über einen möglichst langen Zeitraum zu erbringen, ist von Kraftausdauer die Rede (Rehagel, 2011).

Schnelligkeit im sportlichen Kontext meint die psychophysische Fähigkeit, auf einen Reiz oder ein Signal schnellstmöglich reagieren zu können bzw. Bewegungen bei geringen Widerständen in einer möglichst kurzen Zeit auszuführen (Martin et al., 1993). Als Fähigkeit der optimalen Verknüpfung von energetischem Potential und sensorischer Regulation hat sie sowohl konditionelle als auch koordinative Anteile (Oberger, 2014). Grundsätzlich wird die Schnelligkeit in Reaktions- und Aktions-schnelligkeit unterschieden. Unter Aktionsschnelligkeit versteht man die Fähigkeit, zyklische oder azyklische Bewegungen mit höchster Geschwindigkeit gegen einen geringen Widerstand auszuführen (Weineck, 2010). Die Bewegungsabläufe können in unterschiedliche Phasen eingeteilt werden. Der bewegungsinitiierenden Reaktion schließen sich Antritt und Beschleunigung an. Nach der Beschleunigungsphase wird die maximale Bewegungsgeschwindigkeit erreicht, die nach einer bestimmten Zeit wieder abnimmt.

Als weitere Subkategorie der Schnelligkeit im Grenzbereich zur Koordination stellt die Reaktionsfähigkeit die psychophysische Leistungsvoraussetzung dar, die es ermöglicht, auf ein Signal, einen Reiz oder ein Zeichen in einer bestimmten Geschwindigkeit zu reagieren. Da innerhalb der Definition der Begrifflichkeit der zeitlichen Dimension große Bedeutung zugemessen wird, spricht man hier auch häufig synonym von Reaktionsschnelligkeit (Rehagel, 2011). Im Sport spielt die Reaktionsschnelligkeit immer dann eine Rolle, wenn es auf optische, akustische oder taktile bewegungsauslösende Signale in möglichst kurzer Zeit durch eine motorische Antwort in Form zyklischer oder azyklischer Bewegungen zu antworten gilt. Bei Betrachtung der unterschiedlichen Phasen einer Reaktion wird deutlich, dass die Leistungsfähigkeit des Reizleitungssystems und die Antizipation des Signals wichtige, unmittelbare Einflussgrößen auf die Reaktionsfähigkeit darstellen. Diese sind einerseits abhängig von dem individuellen Erfahrungshorizont bzw. dem individuellen Trainingszustand, andererseits werden sie zu einem großen Teil über die Geschwindigkeit der Nervenleitung bestimmt, die ihrerseits mit der Größe der zugehörigen Neuronen und der Dicke der

Myelinscheiden zusammenhängt (Frey, 2002). Im Kontext der Vorhersehbarkeit eines Signals wird die Reaktionsfähigkeit in die Einfachreaktionsfähigkeit und die komplexe Auswahlreaktionsfähigkeit unterteilt. Bei Einfachreaktionen geht es darum, auf ein feststehendes Signal mit fixen Bewegungen zu antworten. Durch Trainieren dieser Situationen können feste Programme im Gehirn ausgebildet werden, die eine bessere Antizipation ermöglichen. Bei Auswahlreaktionen wird hingegen auf unterschiedliche, vorhersehbare oder nicht vorhersehbare bewegungsauslösende Signale mit einer meist bekannten Bewegung aus einem Pool verschiedener Bewegungsoptionen reagiert. Auswahlreaktionen erfordern somit eine bewusste Entscheidung für eine Bewegungsantwort auf den wahrgenommenen Reiz. Je häufiger ähnliche, Auswahlreaktionen erfordernde Situationen erlebt werden, desto mehr kann die Reaktionszeit durch eine verbesserte Antizipation reduziert werden (Rehagel, 2011).

Unter der Koordinationsfähigkeit im Sport wird das Zusammenwirken vom zentralen Nervensystem mit der Skelettmuskulatur innerhalb eines gezielten Bewegungsablaufes verstanden, welche nach Blume (1978) in die sieben fundamentale Fähigkeiten Differenzierungs-, Reaktions-, Kopplungs-, Orientierungs-, Gleichgewichts-, Umstellungs- und Rhythmisierungsfähigkeit unterteilt werden kann. Auf muskulärer Ebene wird je nach Art dieses Zusammenwirkens zwischen intra- und intermuskulärer Koordination unterschieden. Ist von Koordination im Sinne neuronaler Innervation einzelner Muskelfasern innerhalb eines Muskels bzw. einer Muskelgruppe die Rede, so spricht man von intramuskulärer Koordination. Geht es hingegen bei einer Koordinationsleistung um das Zusammenspiel verschiedener Muskelgruppen, so handelt es sich um intermuskuläre Koordination. Die Ausprägung der koordinativen Fähigkeiten wird entscheidend von informationsaufnehmenden und -verarbeitenden Prozessen bestimmt. Dabei spielt vor allem die neuronale Verschaltung einzelner Muskelfasern und verschiedener Muskelgruppen eine bedeutende Rolle. Der Grad dieser Verschaltung ist dabei von dem individuellen Trainingszustand und dem individuellen Erfahrungshorizont abhängig (Hollmann & Strüder, 2009).

Unter Beweglichkeit im sportlichen Kontext versteht man die Fähigkeit, funktionelle Gelenkbewegungen willkürlich oder gezielt mit der erforderlichen bzw. optimalen Schwingungsweite der beteiligten Gelenke ausführen zu können (Hollmann & Strüder, 2009). Obwohl die Beweglichkeit in den meisten Systematisierungsansätzen als motorische Fähigkeit verstanden wird, ist diese maßgeblich durch die passiven Systeme der Energieübertragung bestimmt und somit die Qualität von Bewegungshandlungen beeinflussend nach Bös (1987) vielmehr als konstitutionelle Leistungsvoraussetzung zu interpretieren (Oberger, 2014).

Darüber hinaus ist in vielen Sportsportarten die Agilität als Mischform der verschiedenen motorischer Fähigkeiten ein wesentlicher Aspekt der Leistungsfähigkeit. Im sportlichen Kontext meint diese die Fähigkeit, mit möglichst geringem Geschwindigkeitsverlust und unter stetiger motorischer Kontrolle explosiv antreten, abbremsen, die Laufrichtung ändern und erneut antreten zu können (Lieshout, 2002). In der Literatur wird sie häufig als Form der Koordination definiert. Durch ihre Abhängigkeit von sportartspezifisch effektiven Bewegungstechniken stellt sie in vielen Sportarten ein Bindeglied zwischen körperlicher Leistungsfähigkeit und technischen und taktischen Fertigkeiten dar. Abbildung 3.2.2 zeigt die Bestandteile der Agilität nach Sheppard & Young (2006).

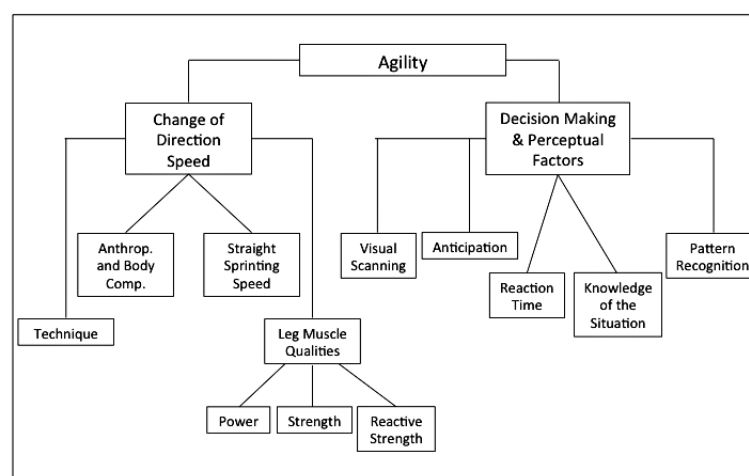


Abbildung 3.2.2: Bestandteile der Agilität nach Sheppard & Young (Sheppard & Young, 2006, S. 922).

Motorische Fähigkeiten bilden die Grundlage sportlicher Leistung und stellen die Basis spielsportlicher Bewegung und spielsportlichen Handelns dar, da erst ein ausreichendes Maß an spezifischen motorischen Fähigkeiten technische und taktische Qualität ermöglicht (Müller et al., 2000). Ihre fundamentale Bedeutung für das Sportspiel allgemein wird auch dadurch deutlich, dass unabhängig von der Sportart gerade auf niedrigem Spielniveau ein regelkonformes Spiel auch mit geringen technischen Fertigkeiten möglich ist. Darüber hinaus können sie auf höherem Spielniveau bei gleichwertigen technischen und taktischen Voraussetzungen die entscheidende Trenngröße für sportlichen Erfolg sein. In Abhängigkeit der spezifischen Belastungs- und Aktivitätsstruktur der jeweiligen Sportart sind die verschiedenen motorischen Fähigkeiten und ihre jeweiligen Subkategorien von unterschiedlich starker Bedeutung, wodurch sich gerade mit zunehmendem Spielniveau und damit einhergehenden immer spezifischeren Anforderungen an die Physis der Sportler ein sportartspezifischer Ausprägungsgrad der einzelnen motorischen Fähigkeiten ergibt (Lieshout, 2002).

3.3 Wirkungsgefüge

Betrachtet man die Zusammenhänge von Belastung, Beanspruchung und körperlicher Leistungsfähigkeit, so hängt die individuelle Beanspruchung (physische Ausbelastung) bei einer bestimmten Belastung (physikalischen Leistung) per Definition maßgeblich von der jeweiligen körperlichen Leistungsfähigkeit ab. Dabei gilt, dass mit Abnahme der körperlichen Leistungsfähigkeit die Beanspruchung im Sinne physischer Ausbelastung bei gleicher Belastung (physikalischer Leistung) und gleicher metabolischer Leistung zunimmt und umgekehrt. Diesen Zusammenhang macht man sich im Sport zu Nutze, um die körperliche Leistungsfähigkeit gezielt zu steigern. Denn durch eine körperliche Belastung, die eine Beanspruchung im Sinne einer Homöostasestörung des Organismus bewirkt (überschwelliger Reiz), können durch überschießende Regeneration (Superkompensation) je nach Reiz funktionelle, morphologische oder metabolische Anpassungsprozesse ausgelöst werden, in deren Folge die körperliche Leistungsfähigkeit in spezifischer Art und Weise erhöht werden kann. Durch Einbezug der Art der Energiebereitstellung kann der Trainingsreiz zusätzlich spezifiziert werden. Bei planmäßiger, sachorientierter systematischer Belastungsgestaltung zum Zwecke der Auslösung gezielter Adaptionen zur Erhöhung der körperlichen Leistungsfähigkeit ist von sportlichem Training die Rede (Weineck, 2012). Das Erstellen von physiologischen Anforderungsprofilen ermöglicht folglich durch Kenntnis der physiologischen Anforderungen sowie der aus diesen resultierenden relevanten Leistungsaspekte einerseits das Spezifizieren der Trainingsinterventionen zur gezielten Steigerung der sportartspezifischen Leistungsfähigkeit und dient andererseits als Grundlage der Identifizierung von Indikatoren für sportartspezifisches und sportartübergreifendes Talent (Drinkwater et al., 2008).

Zusammenhänge von Belastung, Beanspruchung und körperlicher Leistungsfähigkeit sowie deren Auswirkungen auf die Art der Energiebereitstellungen in Sportsportarten lassen sich somit physiologisch wie folgt begründen: Die körperliche Leistungsfähigkeit der Spieler determiniert sowohl die äußere als auch die innere Belastungsstruktur. Je höher die körperliche Leistungsfähigkeit ist, desto höher kann die Belastung im Spiel gewählt werden bzw. desto mehr metabolische Leistung bei vergleichbarer physischer Ausbelastung kann ein Spieler erbringen. Die Art der Belastung sowie der Grad der physischen Ausbelastung determinieren ihrerseits die Art der Energiebereitstellung. Somit erscheint es plausibel, dass mit steigendem Spielniveau unter der Prämisse einer wesentlichen Bedeutung der Physis für die Spielleistung mit Zunahme der körperlichen Leistungsfähigkeit auch die Belastung und metabolische Leistung bei vergleichbarer Ausbelastung zunehmen. Umgekehrt erfordert der Übergang in eine höhere Spielklasse folglich auf Grund der Konfrontation mit in Folge der Belastungssteigerung erhöhten Anforderungen an die Physis eine Steigerung der

körperlichen Leistungsfähigkeit hinsichtlich für die Sportart relevanter Komponenten. Abbildung 3.3.1 stellt das Wirkungsgefüge von Spielstärke/Spielniveau, Belastung, Beanspruchung, körperlicher Leistungsfähigkeit und (anteiliger) Energiebereitstellung dar.

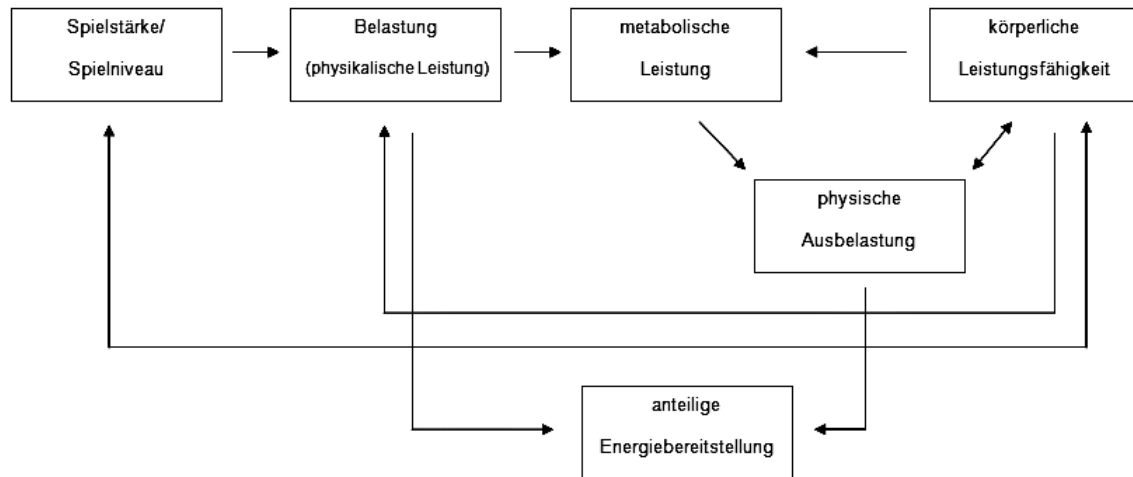


Abbildung 3.3.1: Wirkungsgefüge von Spielstärke bzw. Spielniveau, Belastung, Beanspruchung, körperlicher Leistungsfähigkeit und (anteiliger) Energiebereitstellung.

Aus dem Wirkungsgefüge von körperlicher Leistungsfähigkeit, Belastung und Beanspruchung lassen sich folglich die in Abbildung 3.3.2 und 3.3.3 dargestellten Flussdiagramme extrahieren.

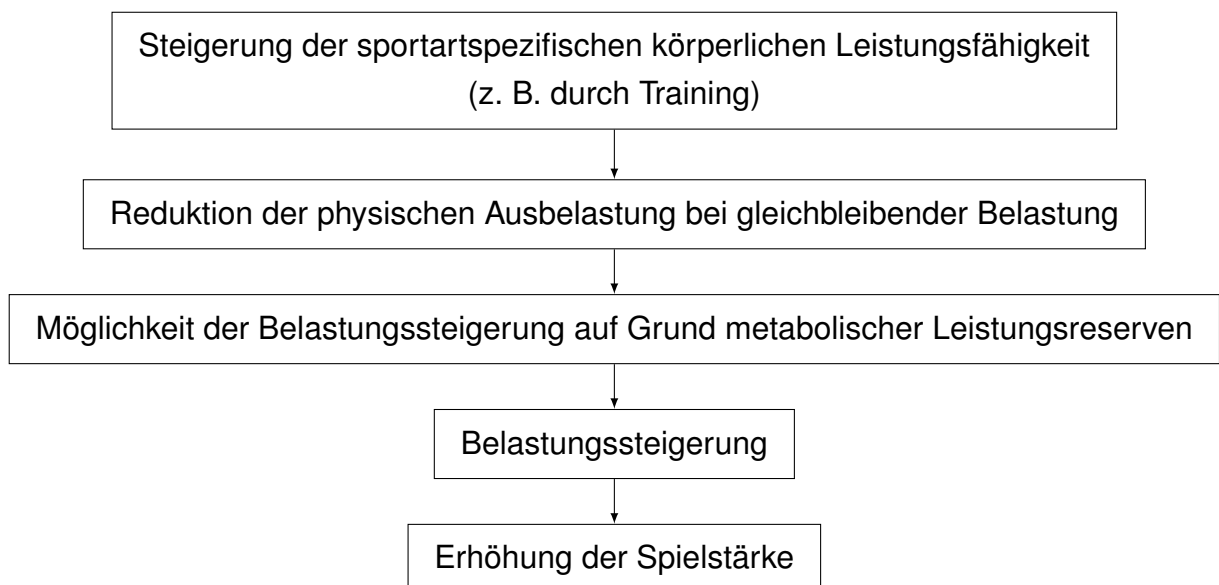


Abbildung 3.3.2: Flussdiagramm Erhöhung der Spielstärke durch Steigerung der körperlichen Leistungsfähigkeit.

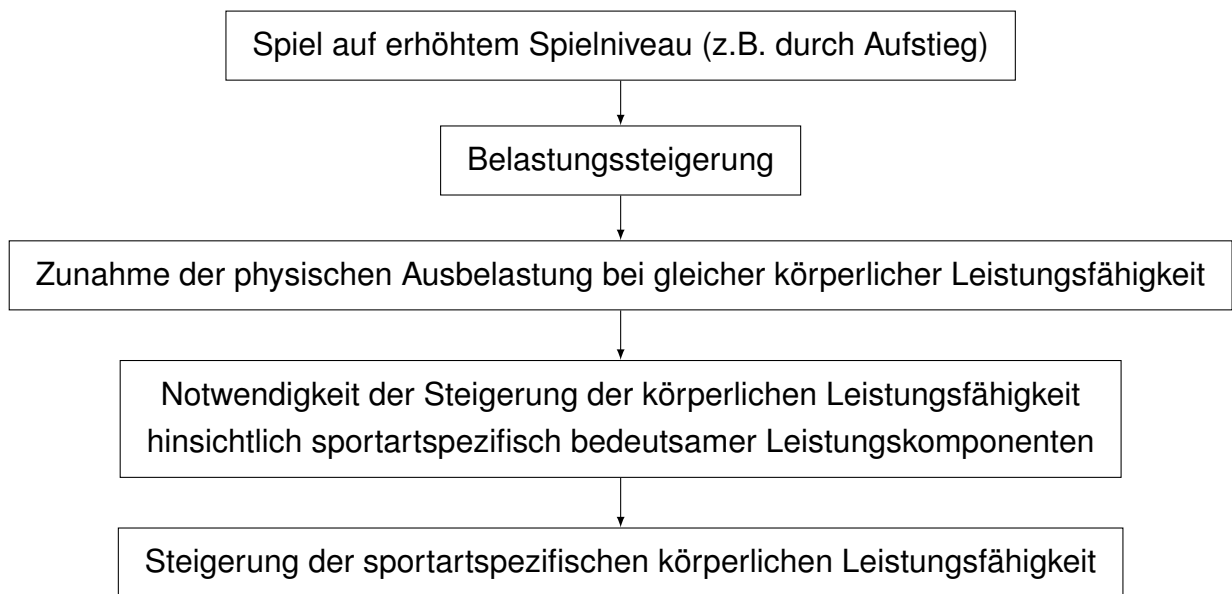


Abbildung 3.3.3: Flussdiagramm Steigerung der körperlichen Leistungsfähigkeit durch Spielen auf erhöhtem Spielniveau.

Vor diesem Hintergrund erscheint es augenscheinlich, dass mit zunehmender sportartspezifischer Belastung auch die körperliche Leistungsfähigkeit der Spieler in spezifischer Art und Weise zunimmt.

Körperliche Beanspruchung als Konsequenz muskulären Leistens ist darüber hinaus im Sinne einer Anstrengungsregulation negativ auf die Leistungserbringung rückgekoppelt. So sind beispielsweise Ausdauersportler in der Lage, bei hoher physischer Ausbelastung rechtzeitig ihre Leistung zu reduzieren, um eine potentiell zum Leistungsabbruch oder zu enormen Leistungseinbußen führende Überanstrengung zu vermeiden (Ullmer, 2001). Mit Blick auf den Erhalt einer möglichst hohen Spielfähigkeit über das gesamte Spiel scheinen somit auch beanspruchungsregulierende Handlungsweisen relevante Aspekte des Anforderungsprofils zu sein.

Wie aus obigen Erläuterungen abgeleitet werden kann, erfordert das Erstellen eines wissenschaftlich fundierten physiologischen Anforderungsprofils einer Sportsportart das experimentelle Erfassen von Belastung, Beanspruchung und der Art der Energiebereitstellung im Spiel sowie deren Bewertung vor dem Hintergrund der daraus resultierenden Anforderungen an die körperliche Leistungsfähigkeit. Eine allgemeine Beschreibung der Methodik zur Erstellung physiologischer Anforderungsprofile erfolgt im Kapitel 6, die nachfolgend im zweiten Teil hinsichtlich der innerhalb dieser Arbeit verwendeten Methoden und Testverfahren zur Erstellung des physiologischen Anforderungsprofils Squash konkretisiert wird.

4 Forschungsbedarf und Zielstellung

Innerhalb aktueller Publikationen wird Squash als eine Sportart beschrieben, die durch den ständigen Wechsel von hoch intensiven Belastungsphasen und kurzzeitigen Belastungspausen gekennzeichnet ist und demnach eine hohe und vor allem spezifische körperliche Leistungsfähigkeit erfordert (Wilkinson et al., 2012). Nach Meinung der Zuschauer, Trainer und insbesondere der Spieler ist Squash nach beschriebener Änderung des Regelwerks zunehmend intensiver geworden. Dabei führen die Spieler die erhöhte Intensität auf ein immer schneller werdendes Spiel zurück.

„A historical emphasis on aerobic conditioning was very much in response to the style of play of the game of squash with 90 to 12-minute played at a steady rhythmical pace requiring high endurance levels of moderate intensity. The modern game of squash can be classified as an intermittent repeated high intensity sport characterized by extremely high-intensity bursts of effort to attack the opposition or defend against attacks. Metabolic conditioning activities have had to increase in intensity to help athletes tolerate the demand of the modern game.“ (Murray et al., 2016b)

Kondric et al. (2010) konnten in einer Studie zur Rückschlagsportart Tischtennis zeigen, dass sich in Folge einer durch Änderungen der Regularien veränderten Belastung sowohl die Beanspruchung im Spiel als auch die körperliche Leistungsfähigkeit der Sportler nachweisbar ändern können. So konnten sie in Folge einer generellen Belastungserhöhung beispielsweise eine höhere metabolische Leistung bei gesteigerter aerober Leistungsfähigkeit der Spieler feststellen.

Obwohl Murray et al. (2016a) in einer Untersuchung zur aktuellen Belastungsstruktur im Squash auf internationalem Spielniveau systematische Veränderungen im Vergleich der alten und neuen Regularien feststellen konnten, lassen die Ergebnisse mit Ausnahme einer aus den Daten ableitbaren höheren Schlagfrequenz innerhalb der aktiven Spielzeit zunächst jedoch eine Intensitätsreduktion vermuten (s. Kapitel 5.1). Ein Vergleich der Ergebnisse der bislang einzigen Untersuchungen zur Beanspruchung unter neuem Regelwerk von Girard et al. (2007) mit denen vor Änderung der Regularien (u.a. Docherty et al., 1978; Blansky et al., 1980; Noakes et al., 1982; van Regensburg et al., 1982; Loots et al., 1983; Gillam et al., 1988; Brady et al., 1989; Montpetit et al., 1990; Brown & Winter, 1995; Mellor et al., 1995; Mahoney & Sharp, 1995) deutet jedoch tatsächlich auf eine Zunahme der physiologischen Anforderungen im Sinne einer Intensitätserhöhung bei gleichzeitiger Zunahme der metabolischen Leistung hin (s. Kapitel 5.2). Allerdings erscheinen auch die Ergebnisse von Girard et al. (2007) unabhängig von veränderten Regularien für den aktuellen Squash nicht mehr repräsentativ. So konnten Laffaye et al. (2015) innerhalb eines

Längsschnitts zur Rückschlagsportart Badminton zeigen, dass sich im Zeitraum von 1992 bis 2012 die Belastungsstruktur und damit auch die Anforderungen einer Sportart innerhalb von zehn Jahren gravierend verändern können. Ein Vergleich der Ergebnisse zur temporalen Belastungsstruktur unter neuem Regelwerk im Squash von Hughes et al. (2006) und Murray et al. (2016a) deutet ebenfalls auf deutliche Veränderungen im Zeitraum von zehn Jahren hin. Einen Hinweis auf eine mögliche Ursache hierfür liefern erneut Girard et al. (2007), die bei einer prinzipiell eher mit Hughes et al. (2006) als mit Murray et al. (2016a) vergleichbaren temporalen Belastungsstruktur eine im Vergleich zu den Ergebnissen vorheriger Untersuchungen extrem hohe und insbesondere verstärkt anaerob laktazide Energiebereitstellung suggerierende physiologische Beanspruchung berichten (Wilkinson et al., 2012). Bei Berücksichtigung des bezüglich der Umstellung des Reglements als Übergangsphase zu bezeichnenden Untersuchungszeitraumes der Studien von Hughes et al. (2006) und Girard et al. (2007) ist derzeit folglich nicht eindeutig geklärt, ob die momentan aktuellsten und bisher umfangreichsten Ergebnisse zur Beanspruchung im Squash die tatsächlichen physiologischen Anforderungen von Squash unter dem neuen Reglement widerspiegeln und diese somit nach Veränderungen des Regelwerks deutlich gestiegen sind, oder ob die von Girard et al. (2007) berichtete Beanspruchung primär auf eine noch fehlende Anpassung der Spielweise auf die neuen Spielbedingungen zurückzuführen ist. Unter der Prämisse einer auch aktuell real beschreibbaren Intensitätserhöhung stellt sich vor dem Hintergrund der von Murray et al. (2016a) berichteten temporalen Belastungsstruktur die Frage nach den diese initiiierenden Aktivitäten. Eine diesbezügliche Analyse der Aktivitätsstruktur im Spiel ist jedoch bisher nicht erfolgt.

Wie zuvor beschrieben sind auch die verschiedenen Komponenten der körperlichen Leistungsfähigkeit in Abhängigkeit der spezifischen Belastungs- und Aktivitätsstruktur einer Sportart von unterschiedlich starker Bedeutung. Auch diesbezüglich ist vor dem Hintergrund der aktuellen Verunsicherung hinsichtlich der physiologischen Anforderungen folglich nicht klar, wie das aktuelle Fitnessprofil im Herrensquash aussieht. Darüber hinaus konnten u. a. Duthie et al. (2003) feststellen, dass sich sportartunabhängig mit im Laufe der Zeit zunehmender Professionalisierung auch das Fitnesslevel der Spieler verändert, was wiederum Einfluss auf die Beanspruchung und Belastung im Spiel haben kann. Folglich kann insgesamt davon ausgegangen werden, dass sich bei einer aktuellen Untersuchung von Belastung, Beanspruchung und körperlicher Leistungsfähigkeit im Squash sowohl regeländerungsinduzierte als auch einer gesteigerten Professionalisierung geschuldete Veränderungen im Vergleich zu den publizierten Ergebnissen früherer Studien finden lassen.

Wie im vorherigen Kapitel dargestellt ist aus leistungsphysiologischer Sicht darüber hinaus die Beteiligung der verschiedenen Energiestoffwechsel an der Energiebereitstellung im Squash von besonderem Interesse. Die Forschung von di Prampero et al. (1981) bildet die methodische Grundlage für die Ableitung der anteiligen Energiebereitstellung aus Sauerstoffaufnahme und Blutlaktatkonzentration, die seither in der Untersuchung verschiedener Sportarten wie Boxen, Karate, Taekwondo und Basketball Anwendung gefunden hat und mittlerweile auch zur Bestimmung der Energiebereitstellung im Tischtennis für Rückschlagsportarten verwendet wurde (Zagatto et al., 2016). Die Kenntnis der möglichst exakten Beteiligung der verschiedenen Energiestoffwechselwege an der Energiebereitstellung im Squash würde durch Ableitung entsprechender leistungsdiagnostischer Inhalte und Trainingsinterventionen eine konkrete Beurteilung und gezielte Steigerung der sportartspezifischen Leistungsfähigkeit ermöglichen. Bislang existiert jedoch kein energetisches Profil für die Sportart Squash.

Darüber hinaus ist keine Studie bekannt, in der die Belastung, Beanspruchung, Energiebereitstellung und körperliche Leistungsfähigkeit von Gewinnern und Verlierern einer Begegnung verglichen wurden. Potentielle Unterschiede könnten jedoch Aufschluss darüber geben, ob unter der Prämisse spielstärkenhomogener Paarungen bei gleichem Spielniveau die körperliche Leistungsfähigkeit eine trennende Größe für Erfolg darstellt oder ob diese eher als eine Art Eingangsvoraussetzung für die Partizipation auf einem bestimmten Spielniveau interpretiert werden muss und technische sowie taktische Aspekte über Sieg und Niederlage entscheiden.

Zur Erstellung von Fitnessprofilen gibt die Review von Fernandez-Fernandez et al. (2014) zu Fitnessprofilen im Tennis Hinweise darauf, dass eine Identifizierung erfolgsbedeutsamer Leistungsgrößen im Hochleistungssport durch einen Vergleich des Ausprägungsgrades unterschiedlicher motorischer Fähigkeiten im Amateur- und Profibereich einer Sportart sinnvoll unterstützt werden kann. Dies beruht auf der Beobachtung, dass die körperliche Leistungsfähigkeit sich in Abhängigkeit der spielniveauspezifischen Anforderungen einer Sportart entwickelt und die Spezifität der Anforderungen auf Grund zunehmender Leistungsdichte mit dem Spielniveau steigt. Unter der Annahme sich mit steigendem Spielniveau zunehmend auf die zentralen Aspekte konzentrierender Fähigkeits- und Fertigungsprofile können auch aus einem Vergleich von Belastung, Beanspruchung, Energiebereitstellung und körperlicher Leistungsfähigkeit unterschiedlicher Spielniveaus wichtige Informationen zum Anforderungsprofil abgeleitet werden. Unabhängig vom Aktualisierungsbedarf wurde die Existenz von systematischen Unterschieden im Vergleich verschiedener Spielniveaus hinsichtlich der Belastung und Beanspruchung im Squash belegt (u. a. Docherty, 1982; Montepetit et al., 1990; Mellor et al., 1995; Reilly & Halsall, 1995; Lees, 2003).

Ein Vergleich von Belastung, Beanspruchung, Energiebereitstellung und körperlicher Leistungsfähigkeit im Amateurbereich mit denen des Hochleistungsbereichs ermöglicht somit eine Identifizierung der mit zunehmendem Spielniveau an Bedeutung gewinnenden Aspekte des physiologischen Anforderungsprofils Squash und kann darüber hinaus Aufschluss darüber geben, wie junge Spieler auf den Spitzensport vorbereitet werden können.

Vor dem dargestellten Hintergrund erscheint es zum einen notwendig, die bisherigen Daten zu Belastung, Beanspruchung, Energiebereitstellung und körperlicher Leistungsfähigkeit im Squash unter Berücksichtigung verschiedener Spielniveaus zu aktualisieren und durch einen Vergleich von Gewinnern und Verlierern um die Komponente Erfolg zu erweitern. Darüber hinaus scheint im Kontext einer hinsichtlich einer möglichst guten Vorbereitung auf die physiologischen Anforderungen der Sportart gezielteren Trainingsgestaltung die Kenntnis des energetischen Profils Squash sowie die Identifizierung von Zusammenhängen von Belastung, Beanspruchung, Energiebereitstellung und körperlicher Leistungsfähigkeit im Squash erstrebenswert. Für die Sportarten Tennis, Badminton und Tischtennis konnten innerhalb verschiedener Untersuchungen konkrete Zusammenhänge von Belastung, Beanspruchung, körperlicher Leistungsfähigkeit und Spielstärke nachgewiesen werden (Ferrauti et al., 2001; Cabello et al., 2003; Kempter, 2008; Zagatto et al., 2016). Obwohl eine solche Untersuchung für die Sportart Squash aktuell nicht bekannt ist, lassen die in Kapitel 3 dargestellten Zusammenhänge von Belastung, Beanspruchung und körperlicher Leistungsfähigkeit in Sportspielen in Abhängigkeit des Spielniveaus vermuten, dass auch für die Sportart Squash solche Zusammenhänge existieren. Um eine die reale Charakteristik der Sportart potentiell verschleiende pauschale Betrachtung zu vermeiden, erscheint es darüber hinaus notwendig, die Belastungsstruktur sowie die Beanspruchung und Energiebereitstellung auf systematische Veränderungen im Spielverlauf zu untersuchen.

Im Kontext der Erstellung eines aktuellen physiologischen Anforderungsprofils Squash ist es Ziel dieser Arbeit, die Belastung, Beanspruchung, Energiebereitstellung und körperliche Leistungsfähigkeit unter Berücksichtigung des aktuellen Regelwerkes deskriptiv zu beschreiben, auf spielniveautrennende Größen und Zusammenhänge zu untersuchen und aus diesen abgeleitet im Vergleich zweier Spielniveaus und unter Einbezug früherer Forschungsergebnisse Aussagen darüber zu treffen, welche Komponenten der körperlichen Leistungsfähigkeit aus welchen potentiellen Gründen im Squash aktuell generell bedeutsam sind und welche mit steigendem Spielniveau bzw. steigender Spielstärke zunehmend an Bedeutung gewinnen. Zusätzlich soll durch einen Vergleich der Aktivitätsstruktur, Beanspruchung, Energiebereitstellung und körperlichen Leistungsfähigkeit von Gewinnern und Verlierern spielstärkenho-

mogener Begegnungen die Bedeutung der körperlichen Leistungsfähigkeit für das Gewinnen einer Partie bei gleicher Spielstärke bewertet werden. Diese Arbeit stellt somit den ersten Versuch der Erstellung eines umfangreichen physiologischen Anforderungsprofils für den Herrenbereich der Sportart Squash dar. Basierend auf den vorherigen Ausführungen wurden die folgenden Leitfragen dieser Arbeit formuliert:

1. Wie sieht aktuell das Belastungsprofil Squash aus?
2. Wie sieht aktuell das Beanspruchungsprofil Squash aus?
3. Wie sieht das energetische Profil Squash aus?
4. Wie sieht aktuell das Fitnessprofil Squash aus?
5. Existieren Veränderungen hinsichtlich der Belastung, Beanspruchung und Energiebereitstellung im Spielverlauf?
6. Existieren aktuell Unterschiede hinsichtlich der Belastung, Beanspruchung, Energiebereitstellung und körperlichen Leistungsfähigkeit in Abhängigkeit vom Spielniveau?
7. Existieren Unterschiede hinsichtlich der Belastung, Beanspruchung, Energiebereitstellung und körperlichen Leistungsfähigkeit von Gewinnern und Verlierern?
8. Welche Zusammenhänge existieren zwischen der Belastung, Beanspruchung, Energiebereitstellung und der körperlichen Leistungsfähigkeit?
9. Welche Spielcharakteristika und physiologischen Leistungsaspekte gewinnen mit zunehmender Spielstärke an Bedeutung?

Die Beantwortung der Leitfragen erfolgt per

- Belastungsprofil:
 - Bestimmung der temporalen Belastungsstruktur und Analyse der Aktivitätsstruktur hinsichtlich ausgewählter Aktionen im Squash in Abhängigkeit von Spielniveau und Sieg und Niederlage sowie Identifikation von Veränderungen im Spielverlauf,
- Beanspruchungsprofil:
 - Bestimmung der Beanspruchung in Abhängigkeit von Spielniveau und Sieg und Niederlage sowie Identifikation von Veränderungen im Spielverlauf,
 - Bestimmung des energetischen Profils in Abhängigkeit von Spielniveau und Sieg und Niederlage sowie Identifikation von Veränderungen im Spielverlauf,
- Fitnessprofil:
 - Bestimmung der körperlichen Leistungsfähigkeit in Abhängigkeit von Spielniveau und Sieg und Niederlage.

5 Forschungshintergrund und Arbeitshypothesen

Nachfolgend werden vor dem Hintergrund der formulierten Forschungsfragen die im Kontext dieser Arbeit relevanten wissenschaftlichen Erkenntnisse zu Belastung (Kapitel 5.1), Beanspruchung (Kapitel 5.2), Energiebereitstellung (Kapitel 5.3), Veränderungen im Spielverlauf (5.4) und körperliche Leistungsfähigkeit (aerobe Leistungsfähigkeit (Kapitel 5.5) und Leistungsniveau bzgl. motorischer Fähigkeiten (Kapitel 5.6)) im Herrensquash unter Berücksichtigung von Alter, Spielniveau und Sieg und Niederlage dargestellt durch die Formulierung von Arbeitshypothesen konkretisiert. Dabei sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass vor dem beschriebenen Hintergrund veränderter Regularien lediglich die Untersuchungen von Hughes et al. (2006), Girard et al. (2005; 2007), Wilkinson et al. (2009; 2012), Krasilschichov (2014), Buote et al. (2016) und Murray et al. (2014, 2016a) eindeutig als Referenzen für Squash unter dem aktuellen Regelwerk eingestuft werden können. Bezüglich der nachfolgenden Darstellungen wird kein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben.

5.1 Belastung im Squash

Die Untersuchungen zur temporalen Belastungsstruktur Squash für unterschiedliche Spielniveaus und Altersklassen reichen von den 1970ern bis heute. Die Studienergebnisse von 1973 bis 2016 zeigen deutliche Unterschiede in Abhängigkeit des Untersuchungszeitpunktes sowie des jeweils aktuellen Reglements, deren statistische Bedeutsamkeit zuletzt von Murray et al. (2014; 2016a) berichtet wurde. In letzterer Untersuchung konnte im Vergleich der alten POS 9 Zählweise mit dem aktuellen PPR 11 Zählsystem auf internationalem Spielniveau insgesamt eine Abnahme der Anzahl gespielter Ballwechsel um 38 %, der Dauer der Ballwechsel um 9 %, der Satzdauer um 28 % und der pro Ballwechsel zurückgelegten Distanz um 15 % bei Zunahme der Anzahl der Schläge pro Ballwechsel um 18 % und leicht reduzierter, aber vergleichbarer effektiver Spielzeit nachgewiesen werden. Die beschriebenen Veränderungen wurden dabei einerseits als unmittelbare Folge der Zählweise (Anzahl der Ballwechsel, Gesamtspielzeit, zurückgelegte Distanz) und andererseits als Folge eines in Konsequenz dieser offensiveren Spiels (Dauer der Ballwechsel, Schlagfrequenz) interpretiert (Murray et al., 2016a). Bei Vergleich der Ergebnisse der Untersuchung zur zeitlichen Belastungsstruktur unter der aktuellen Zählweise PPR 11 von 2006 und 2007 (Hughes et al., 2006; Girard et al., 2007) mit denen ab 2014 fällt auf, dass sich diese im Laufe der Jahre auch nach Einführung des neuen Zählsystems deutlich verändert hat. So ist primär eine Abnahme der durchschnittlichen

Dauer der Ballwechsel und der effektiven Spielzeit bei Zunahme der Schlagfrequenz zu beobachten, was den Eindruck eines potentiell offensiveren Spiels verstärkt. Somit erscheint die temporale Belastungsstruktur im aktuellen Herrensquash hinsichtlich der letztgenannten Parameter lediglich durch die Ergebnisse der Studien von Murray et al. (2014; 2016a) zu Squash auf internationalem Spielniveau beschreibbar.

Bei Betrachtung der aktuellen Untersuchungsergebnisse werden im Squash auf internationalem Niveau durchschnittlich ca. 20 – 21 Ballwechsel pro Satz mit einer durchschnittliche Dauer von 13 – 14 s gespielt (Murray et al., 2014; 2016a). Bei durchschnittlich 8 bis 13-sekündigen Pausen zwischen den Ballwechseln ergibt sich im aktuellen Herrensquash eine durchschnittliche Satzdauer von 194 – 1113 s (Hughes et al., 2006; Girard et al.; 2007, Murray et al. 2014; 2016a). Bei minimal drei Sätzen pro Begegnung, die ihrerseits von wenigen Minuten bis zu mehr als einer Stunde andauern können, kann die Gesamtspielzeit im Extrem wenige Minuten oder aber deutlich mehr als eine Stunde betragen (Murray et al., 2016a). Die effektive Spielzeit beträgt 51 – 56 % der Netto-Gesamtspielzeit. Die Relation aus Belastung und Pause liegt in etwa bei 1 : 1 (Murray et al., 2014; 2016a). Die Dauer der Ballwechsel und die Anzahl der Schläge pro Ballwechsel sind zufällig verteilt und reichen von 1 – 2 -sekündigen Ballwechseln mit nur einem Schlag bis zu Ballwechseln mit einer Dauer von 147 s mit 157 Schlägen (Girard et al., 2007; Vučković et al. 2009 ; Murray et al., 2016a). Durchschnittlich werden jedoch ca. 13 Schläge pro Ballwechsel ausgeführt, woraus sich unter Berücksichtigung der Dauer der Ballwechsel bzw. der durchschnittlichen Satzdauer Schlagfrequenzen von bis zu mehr als 45 Schlägen pro Minute der aktiven Spielzeit und bis zu 24 Schlägen pro Minute der Netto-Gesamtspielzeit berechnen lassen (Murray et al., 2016a).

Murray et al. (2016a) konnten für den aktuellen Profi-Herrensquash wie Docherty (1982) und Montpetit et al. (1990) zuvor für unterschiedliche Spielniveaus eine deutliche Veränderungen der temporalen Belastungsstruktur in Abhängigkeit der Spielstärke nachweisen. Die insgesamt 41 analysierten Spiele der Rowe British Grands Prix 2010 und 2011 teilten sie in Abhängigkeit des internationalen Ranglistenplatzes der Spieler in zwei Kategorien auf ($1 - 39, \geq 40$). Sie konnten zeigen, dass die Länge der Partien (56 min zu 26 min), die innerhalb dieser von den Spielern zurückgelegte Distanz (1995,7 m zu 953,1 m), die Anzahl der gespielten Ballwechsel (82 zu 51) sowie die durchschnittliche Dauer der Ballwechsel (13,3 s zu 11,4 s) bei Begegnung höher gelisteter Spieler deutlich höher waren als bei niedriger gelisteten Spielern, wohingegen die effektive Spielzeit bezogen auf die Gesamtspielzeit mit 42,5 % zu 44,23 % vergleichbar, aber tendenziell in Spielen der niedriger gerankten Spieler höher war. Somit kann vermutet werden, dass sich auch bei aktueller Untersuchung der temporalen Belastungsstruktur vergleichbare Unterschiede in Abhängigkeit der Spielstärke und insbesondere des Spielniveaus ergeben und die mit der Spielstärke

zunehmenden Anforderungen an die körperliche Leistungsfähigkeit aus zeitlicher Perspektive auch aktuell primär aus einer Steigerung der Belastungsdauer und des Belastungsumfanges resultieren. Darüber hinaus könnte auf Basis dieser Ergebnisse eine mögliche Zunahme der Pausendauer mit der Dauer der Ballwechsel vermutet werden. Allerdings erscheinen die Ergebnisse diesbezüglich nicht ganz eindeutig. So berichten Murray et al. (2014) für Spiele der internationalen Elite bei einer im Vergleich zu den Ergebnissen von Murray et al. (2014) höheren Dauer der Ballwechsel auch eine höhere effektive Spielzeit, was einem eindeutigen Zusammenhang von Pausenlänge und Ballwechseldauer widerspricht.

Tabelle 5.1 gibt einen Überblick über die wesentlichen Forschungsergebnisse zur zeitlichen Belastungsstruktur im Squash. Dabei haben lediglich die letzten vier Studien Squash unter dem aktuellen Zählsystem untersucht.

Tabelle 5.1: Zeitliche Belastungsstruktur im Herrensquash.

Autor(en)	Spielniveau	R	DR [s]	RT [s]	EPT [%]	TPT [s]	S	SF _{TPT} [spm]
Blansky et al. 1973	A-Grade	-	-	-	69	-	-	-
Blansky et al. 1973	C/D-Grade	-	-	-	54	-	-	-
Montpetit et al. 1977	B-Grade	-	-	-	65,6	-	-	-
Beaudin et al. 1978	B-Grade	-	-	-	58	-	-	-
Montgomery et al. 1981	C/D-Grade	-	-	-	52	-	-	-
Docherty 1982	A-Grade	116 ^a	8,	-	56,3	1014	-	-
Docherty 1982	B-Grade	119 ^a	8,4	-	54	975	-	-
Docherty 1982	C/D-Grade	139	4,4	-	53	735	-	-
Mercier et al. 1987	A-Grade	-	-	-	61	-	-	-
Mercier et al. 1987	C/D-Grade	-	-	-	53	-	-	-
Montpetit et al. 1990	Elite	30,5 ^b	13,6	9	60,1	696	4,8	20,3
Montpetit et al. 1990	A-Grade	30 ^b	16,6	8	67,5	738	6	21,8
Montpetit et al. 1990	B-Grade	27 ^b	9,9	8,3	54,7	486	4,1	22
Montpetit et al. 1990	C-Grade	27 ^b	8	6,9	53,7	486	3	23,3
Hughes & Robertson 1996	International	26 ^b	21	10	-	-	-	-
Vučković et al. 2009b	Elite	34 ^b	16,55	-	55	1005	-	-
Vučković et al. 2009b	National	26 ^b	13	-	-	335	-	-
Vučković et al. 2009b	Lokal	25 ^b	7,9	-	-	197	-	-
Hughes et al. 2006	International	18	25,98	12,71	65 ^d	721 ^b	12,99	19,5 ^d
Girard et al. 2007	National/International	18 ^d	18,6	8,6 ^d	69,7	476 ^d	-	-
Murray et al. 2014	Elite	20 ^b	14,2	-	56	533	-	-
Murray et al. 2016a	International	21 ^b	13,2	-	51,4	697	13	23,5

^a: pro Spiel, ^b: pro Satz, ^d: aus den Daten abgeleitet.

Anzahl der Ballwechsel (R), Dauer der Ballwechsel (DR), Dauer der Pausen zwischen den Ballwechseln (RT), effektive Spielzeit (EPT), Netto-Gesamtspielzeit (TPT), Anzahl der Schläge pro Ballwechsel (S), Schlagfrequenz in der Gesamtspielzeit (SF_{TPT}).

Neben der temporalen Belastungsstruktur stellen auch die Art und Frequenz der Aktivitäten der Spieler auf dem Court als innere Belastungsstruktur belastungsbestimmende Größen und somit ein wesentliches Bindeglied zu den physiologischen Anforderungen im Squash dar. Erste Versuche der Definition und Quantifizierung von zentralen Bewegungen und Ereignissen während eines Squashspiels per manueller Notation gehen auf Reilly & Thomas (1976) und Sanderson & Way (1979) zurück.

Bei diesen Untersuchungen stand vor allem das Erfassen verschiedener Schlagtechniken sowie die Lokalisation von zum Punktgewinn führenden Schlägen im Fokus. Aufbauend auf den manuellen Analyseinstrumenten der 1970er Jahre entwickelte Hughes (1985) und Hughes & Mc Gary (1989) ein computerunterstütztes System zum Messen von Bewegungsparametern im Spiel, wodurch die direkte und deutlich schnellere Erfassung von Bewegungsaspekten und somit auch die Überprüfung von früheren Annahmen zu Spieltaktik und Spielverhalten möglich wurden. Bis heute existiert eine Vielzahl von Studien, in denen verschiedene Bewegungsaspekte wie die Schlagverteilung auf dem Court, die Bewegungsgeschwindigkeit im Spiel, die Existenz von Bewegungsmustern sowie die Nutzung der T-Zone in Abhängigkeit von Spielniveau, Alter und Geschlecht sowie Sieg und Niederlage untersucht wurden (u. a. Hughes, 1986; Hughes & Franks, 1994; Hughes & Knight, 1995; Hughes & Robertson, 1998; Hughes, Wells & Matthews, 2000; Pereira et al., 2001; Hughes et al., 2006; Vučković et al., 2003, 2004, 2005, 2013, 2016; Murray et al., 2014, 2016a). Für diese Arbeit erscheinen jedoch lediglich die Studien relevant, die verschiedene Aktivitäten im Kontext von Belastung im Herrensquash in Abhängigkeit vom Spielniveau analysiert haben sowie darüber hinaus Hinweise auf potentielle Unterschiede zwischen Gewinnern und Verlierern geben.

Um Aussagen darüber machen zu können, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein bestimmter Schlag direkt oder indirekt zum Punktgewinn bzw. Punktverlust führt, veränderten Mc Gary und Franks (1995) den Blick auf die bisher gesammelten Daten. Sie fassten das Squashspiel als ein dynamisches System auf, in dem sich stabile und instabile Phasen abwechseln und vor allem Schläge eine Rolle spielen, die zu einer Störung der Stabilität führen und somit für den Gegner kritische, instabile Situationen erzeugen. Dies verschob den Fokus der Untersuchung von erfolgreichen Handlungen von Schlägen, die direkt oder indirekt zum Erfolg führen, zu den Erfolg initiiierenden Ursachen. In diesem Zusammenhang konnten Hughes et al. (2001) und Vučković et al. (2013) zeigen, dass der Volleyschlag einer der wichtigsten Schläge im professionellen Squash ist, um das Spielgeschehen zu bestimmen und für den Gegner kritische Situationen zu erzeugen. Vučković et al. (2013) vermuteten darüber hinaus, dass auch unerwartet nach vorne gespielte Bälle eines der wesentlichen Mittel darstellen könnten, um Druck auf den Gegner auszuüben. Bei Assoziation von erhöhtem Druck mit erhöhten körperlichen Anforderungen beispielsweise im Sinne in kürzerer Zeit zurückzulegender Distanzen könnten Volleyschläge potentiell zu einer höheren Belastung für den Gegner führen und beobachtungsbasiert mit Antritten korrelierte vorne geschlagene Bälle Ausdruck einer höheren Belastung sein. Die Vermutung eines Zusammenhanges zwischen einer potentiell hohen Belastung und vorne ausgeführten Schlägen wird durch die generelle Dominanz der Schläge im hinteren Courtbereich gestärkt (s. Tabelle 5.2).

Unter der Prämisse einer im aktuellen Squash aus der Aktivitätsstruktur resultierenden Intensitätserhöhung kann vor diesem Hintergrund unter zusätzlicher Berücksichtigung einer gestiegenen Schlagfrequenz zunächst vermutet werden, dass die Anzahl vorne und volley geschlagener Bälle seit Änderung des Regelwerks zugenommen hat. Jedoch deutet ein Vergleich der Untersuchungsergebnisse von Hong et al. (1996) mit denen von Vučković et al. (2013) und insbesondere von Murray et al. (2016a) auf eine Abnahme vorne gespielter Bälle hin. Allerdings ist an dieser Stelle auf eine bei Hong et al. (1996) nicht vorgenommene zusätzliche Differenzierung eines mittleren Courtbereichs zu verweisen, die eine eindeutige Ableitung eines diesbezüglichen Entwicklungstrends auf Basis der bisherigen Datenlage nicht ermöglicht. Dennoch konnten Murray et al. (2016) eine negative Korrelation zwischen der Anzahl vorne geschlagener Bälle und der Länge der Ballwechsel feststellen, was vor dem Hintergrund einer abnehmenden Dauer der Ballwechsel aktuell eine Zunahme der Anzahl vorne gespielter Bälle auch auf internationalem Spielniveau andeutet.

Hinsichtlich der quantitativen Nutzung des vorderen und hinteren Courtbereichs stellten Hong et al. (1996) Unterschiede in Abhängigkeit des Spielniveaus fest. Sie konnten zeigen, dass auf nationalem Spielniveau im Vergleich zum internationalen Spielniveau signifikant mehr Bälle prozentual im vorderen Bereich des Courts gespielt werden und auch die Anzahl der geschlagenen Volley auf nationalem Spielniveau prozentual signifikant höher ist. Da unter dem alten Regelwerk primär eine abwartende, defensive Taktik gespielt wurde, deren Ziel es war, den Ball überwiegend tief in die hinteren Courtecken vorwiegend auf die Rückhandseite des Gegners zu spielen, führten sie dies auf geringere technische Fertigkeiten der Spieler auf nationalem Spielniveau zurück. Dies ist in Übereinkunft mit Hughes & Robertson (1998), die die Spielmuster von Spielern unterschiedlicher Spielniveaus untersuchten. Sie konnten zeigen, dass Spieler auf niedrigem Spielniveau keine stabile Spieltaktik und Bewegungsmuster entwickeln, was, wie sie vermuteten, der geringeren Präzision der Schläge geschuldet war, in deren Folge auffällig viele kurze Schläge registriert wurden. Vor diesem Hintergrund scheint es auch nicht verwunderlich, dass Montpetit et al. (1990) eine Abnahme der Schlagfrequenz mit steigendem Spielniveau berichten. Diese Ergebnisse suggerieren zunächst eine durch technische Defizite bedingte Zunahme der Schlagfrequenz sowie der Anzahl vorne und volley ausgeführter Schläge mit abnehmendem Spielniveau. Unter der Annahme eines unter dem aktuellen Regelwerk auf hohem Spielniveau jedoch immer offensiver werdenden Spiels kann aktuell jedoch vermutet werden, dass sich trotz der Existenz von Spielmustern und ausreichend guter Schlagpräzision auch hier eine erhöhte quantitative Nutzung des vorderen Courtbereichs sowie vermehrt volley geschlagene Bälle feststellen lassen, so dass sich unter der Voraussetzung des Erhaltes der ursprünglichen Tendenz auf niedrigem Spielniveau hinsichtlich der Schlagfrequenz und der Anzahl und Häufigkeit vorne und volley gespielter Bälle möglicherweise keine spielniveaubedingten Unter-

schiede mehr finden lassen. Denn während defensive Strategien mit langen Bällen in die hinteren Ecken des Courts insbesondere auf die Rückhandseite assoziiert werden, ist das offensive Spiel durch attackierende Schläge wie Volleyschläge und Schläge nach vorne geprägt (Murray et al., 2016a).

In einigen Studien wurde darüber hinaus das Laufverhalten auf unterschiedlichen Spielniveaus und hinsichtlich potentieller Unterschiede zwischen Gewinnern und Verlierern untersucht. Eubank & Messenger (2000) konnten diesbezüglich in einer Studie zum Bewegungsverhalten im Spiel zeigen, dass Spieler auf regionalem Spielniveau unabhängig von der Schrittart innerhalb der aktiven Spielzeit pro Satz durchschnittlich 580 und pro Spiel im Mittel 2866 Schritte ausführen. Murray et al. (2016a) berichten auf internationalem Spielniveau eine durchschnittliche Laufgeschwindigkeit innerhalb der Ballwechsel von $1,4 \text{ m s}^{-1}$ und weisen auf eine leichte Abnahme der durchschnittlichen Laufgeschwindigkeit seit Änderung des Regelwerks hin. Diese Geschwindigkeitsreduktion steht jedoch im Widerspruch zu Buote et al. (2016), die auf vergleichbarem Spielniveau mit $1,8 \text{ m s}^{-1}$ eine aktuell gestiegene durchschnittliche Laufgeschwindigkeit berichten.

Im Kontext der Identifizierung von Veränderungen in Abhängigkeit des Spielniveaus konnten Vučković et al. (2010) zeigen, dass Spieler auf internationalem Niveau in durchschnittlich um 414 s längeren Sätzen mit 1118 m deutlich mehr Distanz pro Satz zurücklegen als Spieler auf nationalem Niveau (615 m) und bezogen auf die aktive Spielzeit eine annähernd doppelt so hohe Aktionsrate haben. Dies führten sie auf eine besseren technischen Fertigkeiten geschuldete höhere Schlagpräzision und bessere taktische Fähigkeiten sowie eine bessere Fitness der Spieler auf internationalem Spielniveau zurück. Auf der Grundlage einer nachgewiesenen besseren Präzision in den Schlägen (Vučković et al., 2009) und einer höheren körperlichen Leistungsfähigkeit (s. Kapitel 5.5) erscheint es auch bei hypothetisch offensiverer Spieltaktik auf internationalem Niveau kaum möglich, über einzelne Schläge zum Punktgewinn zu gelangen. Stattdessen werden verschiedene mehr oder weniger lange Schlagkombinationen das Mittel der Wahl. Daraus resultierend ergeben sich längere Ballwechsel und größere Distanzen, die während eines Ballwechsels auf Grund eines potentiell erhöhten Spieltempos (höhere Schlagfrequenz) in kürzerer Zeit zurückgelegt werden müssen.

Hughes & Franks (1994), Hughes et al. (2007), Vučković et al. (2004), Vučković et al. (2010), Buote et al. (2016) und Murray et al. (2016a) untersuchten die Laufgeschwindigkeit und zurückgelegte Distanz auch in Abhängigkeit der gespielten Taktik, des Ausgangs eines Ballwechsels sowie Sieg und Niederlage für unterschiedliche Spielniveaus. Hughes & Franks (1994), Hughes et al. (2007) sowie Vučković et al. (2010) konnten zeigen, dass bei Spielen auf nationalem und internationalem

Spielniveau die Geschwindigkeit und die innerhalb des Ballwechsels zurückgelegte Distanz am Ende eines Ballwechsels bei Punktverlust höher war als bei Punktgewinn, wohingegen bei Spielen in niedrigen Ligen der umgekehrte Trend beobachtet werden konnte. Dies führten sie darauf zurück, dass auf hohem Spielniveau die Taktik darin besteht, einen möglichst hohen Druck auf den Gegner auszuüben, so dass dieser den Ball entweder nicht mehr erreichen kann oder zum Begehen eigener Fehler provoziert wird und dass immer der Spieler situativ mehr Distanz zurücklegen muss, der stärker unter Druck steht. Dabei kann jedoch auch in stabile Phasen zurückgekehrt werden, in denen beide Spieler die gleiche Strecke zurücklegen (Vučkovič et al., 2010). Vor dem Hintergrund dieser Erläuterung scheint es nicht verwunderlich, dass Vučkovič et al. (2004) wider vorheriger Vermutungen zu dem Ergebnis kamen, dass die Gewinner einer Begegnung größere Strecken zurücklegen als Verlierer und sowohl Buote et al. (2016) als auch Murray et al. (2016a) zeigen konnten, dass im aktuellen professionellen Herrensquash die Verlierer bei annähernd gleicher Bewegungsgeschwindigkeit von durchschnittlich $1,4 \text{ m s}^{-1}$ (Murray et al., 2016) bzw. $1,8 \text{ m s}^{-1}$ (Buote et al., 2016) unwesentlich mehr Strecke zurücklegen als die Gewinner (18,7 zu 19,4 m pro Ballwechsel, 0,06 % pro Satz). Es wurde daraufhin vermutet, dass die Anzahl von Bewegungsaktionen während der Ballwechsel auf Grund zyklischer Bewegungsmuster vom T in die Ecken des Courts im gegenläufigen Rhythmus der beiden Spieler annähernd gleich ist. Eine Bestimmung der Aktionsrate von Gewinnern und Verlierern ist bislang nicht erfolgt. Dennoch scheint somit auf nationalem und internationalem Spielniveau kein Zusammenhang zwischen der zurückgelegten Distanz, der durchschnittlichen Bewegungsgeschwindigkeit und dem Ausgang eines Ballwechsels, Satzes oder Spieles zu existieren.

Hinsichtlich weiterer Unterschiede zwischen Gewinnern und Verlierern einer Begegnung konnten Hughes & Robertson (1996) zeigen, dass auf internationalem Spielniveau die Gewinner eines Spiels deutlich mehr Winner und deutlich weniger Unforced Error pro Spiel schlagen als die Verlierer (Relation der Winner und Unforced Error bei Gewinnern mit 1,9 zu 0,97 bei Verlierern; Begriffserläuterungen zu Winner und Unforced Error s. Kapitel 11.3.2).

Vor dem Hintergrund der potentiell hohen Bedeutung einer funktionalen Nutzung der T-Zone für die Spielleistung untersuchten Vučkovič et al. (2004; 2009) im Kontext von Spieldominanz als möglichen Indikator für diese die Frequenz und Dauer der Nutzung der T-Zone in Abhängigkeit von Spielniveau sowie Sieg und Niederlage. Unabhängig vom Ausgang einer Partie konnten Vučkovič et al. (2004) zeigen, dass Spieler der nationalen Elite mit 170 s ca. 40 % der aktiven Spielzeit innerhalb der T-Zone sind. Darüber hinaus stellten sie fest, dass mit Ausnahme sehr enger Spiele der Gewinner eine längere Standzeit auf dem T als der Verlierer hat und die Gewinner die T-Zone mit durchschnittlich 94,79 mal systematisch häufiger vor Ausführung des gegneri-

schen Schlages erreichen als die Verlierer mit durchschnittlich 88,79 mal (Vučkovič et al., 2004; 2009). Diese Ergebnisse wurden in einer aktuellen Studie von Buote et al. (2016) gestärkt, die feststellten, dass der Gewinner sich gewöhnlich in einem geringeren Radius zum T bewegt als der Verlierer. Darüber hinaus konnten Vučkovič et al. (2009) eine Zunahme des trennenden Effektes hinsichtlich der T-Nutzung mit Abnahme der Umkämpftheit einer Partie nachweisen. Dies interpretierten sie als Nachweise für die Bedeutung einer möglichst hohen mit der T-Nutzung assoziierten Spieldominanz für Erfolg.

Bislang existiert keine Studie, in der das Nutzungsverhalten der T-Zone in Abhängigkeit des Spielniveaus untersucht wurde. Unter der Annahme einer zunehmenden Bedeutung der Spieldominanz für Erfolg sowie einer zentralen Ausgangsposition als Voraussetzung für das Erreichen immer präziser in die Ecken gespielter Bälle, kann vermutet werden, dass sowohl die Nutzungsfrequenz als auch die Standzeit auf dem T mit steigendem Spielniveau zunehmen.

Beobachtungsbasiert scheint im Kontext von Beanspruchungsregulation und Spieldominanz auch das möglichst ökonomische Bewegen auf dem Court bedeutsam zu sein. Hierbei geht es vor allem darum, möglichst schnell, direkt und kraftschonend die Wege zum Ball und zum T zurückzulegen. Es existiert keine aktuelle Studie die unterschiedliche Laufbewegungen im Squash quantifiziert und hinsichtlich ihrer Ökonomie untersucht hat. Auf Grund der Reichweite der Bewegungen und ihrer Flexibilität an den Umkehrpunkten kann vermutet werden, dass Sidesteps im Vergleich zu Schritten ökonomischere Laufbewegungen bzw. Bewegungen zum Ball darstellen könnten (Kempter, 2008). Unter der Annahme eines sich mit steigendem Spielniveau zunehmend ökonomisierenden Laufverhaltens kann eine Zunahme des Anteils der Sidesteps mit dem Spielniveau vermutet werden.

Weiter kann ebenfalls unter der Prämisse einer möglichst hohen Spieldominanz für Erfolg vermutet werden, dass maximal intensive Aktionen wie maximaltiefe Ausfallschritte, Antritte und plötzliche, harte Richtungswechsel als ein Indiz für Druck interpretiert werden können und folglich die Anzahl und Frequenz maximal intensiver Aktionen bei Gewinnern geringer als bei Verlierern ist. Tabelle 5.2 enthält exemplarische Ergebnisse zum Schlagprofil Squash.

Tabelle 5.2: Übersicht bisheriger Forschungsergebnisse zu ausgewählten Aspekten des Schlagprofils im Herrensquash

Autor(en)	Spielniveau	FRONT	MIDDLE	BACK	FH	BH	Winner	Unforced Error
Hong et al. 1996	International	23,9	-	76,1	58,81	41,19	5,24	4,48
Hong et al. 1996	National	29,1	-	70,9	54,07	45,93	5,37	5,24
Hughes & Robertson 1996	International	-	-	-	-	-	9 ^a	5 ^a
Hughes & Robertson 1996	International	-	-	-	-	-	6 ^b	6 ^b
Hughes et al. 2006	International	-	-	-	-	-	60,1 ^c	27 ^c
Vučković et al. 2013	International	9,6	32,1	58,3	-	-	-	-
Murray et al. 2016a	International	10,3	31,3	58,4	-	-	-	-

^a: Gewinner Spiel ^b: Verlierer Spiel ^c: bezogen auf das gesamte Spiel

Schläge vorne (FRONT), Schläge hinten (BACK), Vorhandschläge (FH), Rückhandschläge (BH), Volleyschläge (Volley) jeweils in Prozent der Netto-Gesamtschläge.

5.1.1 Hypothesen zur Belastung im Squash

Vor dem dargestellten Forschungshintergrund zur Belastung im Squash wurden die nachfolgenden Forschungshypothesen formuliert.

Hypothesen zur Belastung in Abhängigkeit des Spielniveaus

- H 1.1 Es existieren Unterschiede hinsichtlich der temporalen Belastungsstruktur in Abhängigkeit des Spielniveaus. Insbesondere die Dauer der Ballwechsel und die Gesamtspielzeit sind Squash national größer als Squash regional.
- H 1.2 Es existieren Unterschiede hinsichtlich des Aktivitätsverhaltens in Abhängigkeit des Spielniveaus.
- H 1.2.1 Die Rate an Laufaktionen ist Squash national höher als Squash regional.
- H 1.2.2 Die Anzahl der Sidesteps ist Squash national höher als Squash regional.
- H 1.2.3 Die Nutzungsfrequenz der T-Zone und Standzeit auf dem T sind Squash national größer als Squash regional.

Hypothesen zu Unterschieden hinsichtlich der Aktivitäten von Gewinnern und Verlierern

- H 1.3 Es existieren Unterschiede hinsichtlich des Aktivitätsverhaltens von Gewinnern und Verlierern.
- H 1.3.1 Die Anzahl der Volleyschläge, die Nutzungsfrequenz der T-Zone sowie die Standzeit auf dem T sind bei Gewinnern höher als bei Verlierern.
- H 1.3.2 Die Anzahl maximal intensiver Aktionen sowie der Schläge im vorderen Bereich des Courts sind bei Verlierern höher als bei Gewinnern.

5.2 Beanspruchung im Squash

Die Beanspruchung im Squash wurde ebenfalls seit den 1970er Jahren auf unterschiedlichen Spielniveaus unter Berücksichtigung verschiedener Altersklassen

untersucht (s. Tabelle 5.3). Herzfrequenz- und Blutlaktatmessungen bildeten dabei aus technischen Gründen lange die Grundlage der Beanspruchungsbeurteilung im Spiel. Vor der Erfindung portabler und für die Feldmessung geeigneter Spiroergometer wurde in vereinzelt Studien darüber hinaus versucht, anhand der im Court gemessenen durchschnittlichen Herzfrequenz die durchschnittliche Sauerstoffaufnahme abzuschätzen, um mittels Sauerstoffaufnahme als Prädiktor erste Aussagen zur metabolischen Leistung im Squash machen zu können. Die ersten Versuche, die Sauerstoffaufnahme im Squashspiel per Douglas-Bags direkt zu messen, gehen auf Montpetit et al. (1977) zurück. Auf Grund der begrenzten Kapazität dieser Bags und einer daraus resultierenden hohen Leerungsfrequenz war jedoch mit dieser Methode die Simulation eines regulären Spiels noch nicht möglich. Stattdessen wurde die über einen Zeitraum von einer Minute an drei verschiedenen Zeitpunkten innerhalb eines 25-minütigen Satzes ausgeatmete Luft analysiert und das Spiel nach jeder Messung für ca. 30 s unterbrochen. Die erste kontinuierliche Messung der Atemgase (alle 15 s) per portabler Telemetrie in auf die Dauer von 3 min genormten Spielen wurde von Todd et al. (1996) durchgeführt. Die aktuellste und bisher realitätsnächste Untersuchung der Beanspruchung im Squash mit kontinuierlicher telemetrischer Herzfrequenz- und Atemgas- sowie punktueller Blutlaktatkonzentrationsmessung während einer aus drei Sätzen bestehenden Wettkampfsimulation stammt von Girard et al. (2007).

Die verschiedenen Untersuchungen zur Beanspruchung im Squash stellen nach einem initial rapiden Anstieg von Herzfrequenz und Sauerstoffaufnahme in den ersten Spielminuten auf 80 – 90 % des Maximalwertes (Blansky et al., 1973; Girard et al., 2007) durchschnittliche Herzfrequenzwerte von 70 – 90 % der HR_{max} , eine durchschnittliche Sauerstoffaufnahme von 51 – 86 % der relativen $\dot{V}O_{2max}$ (35 bis 55 $ml\ kg^{-1}\ min^{-1}$) und durchschnittliche Post-Match-Blutlaktatkonzentrationen von ~ 1 bis $\sim 8\ mmol\ l^{-1}$ fest, wobei sich erneut Unterschiede in Abhängigkeit von Spielniveau, Altersdurchschnitt und Untersuchungszeitpunkt feststellen lassen.

Trotz geringer Datendichte kann bei Vergleich der Studienergebnisse jeweils vergleichbarer Probandenpools der letzten 40 Jahre eine Zunahme der Beanspruchung insbesondere in Form der durchschnittlichen Sauerstoffaufnahme und Post-Belastungs-Blutlaktatkonzentration beobachtet werden, welche nach Einführung des neuen Regelwerks nochmal deutlicher erscheint und in den Ergebnissen von Girard et al. (2007) ihren vorläufigen Höhepunkt findet. Diese Entwicklung erscheint unter Berücksichtigung der in Kapitel 5.1 in Tabelle 5.1 dargestellten Veränderung der zeitlichen Belastungsstruktur bis 2007 insbesondere vor dem Hintergrund des von Girard et al. (2007) postulierten positiven Zusammenhangs von langen, hoch intensiven Ballwechseln und einer durchschnittlichen Beanspruchung oberhalb von 90 % der $\dot{V}O_{2max}$ sowie von der durchschnittlichen Beanspruchungsdauer oberhalb von 90 % der $\dot{V}O_{2max}$ und der durchschnittlichen Post-Belastungs-Blutlaktatkonzentration

plausibel. Dies bestätigt zunächst den Eindruck einer vermutlich einer gesteigerten Professionalität geschuldeten und möglicherweise auch regeländerunginduzierten Zunahme der körperlichen Anforderungen im Sinne eines deutlichen Anstiegs der zu erbringenden metabolischen Leistung bei generell vergleichbarer aerober Leistungsfähigkeit (s. Kapitel 5.5).

Unter der Annahme einer sich seit der Untersuchung von Girard et al. (2007) jedoch erneut verändert habenden Belastungsstruktur mit der Tendenz zu kürzeren Ballwechseln und einer höheren Aktionsrate kann vor dem Hintergrund des in Kapitel 3.3 dargestellten kausalen Zusammenhangs von Belastung und Beanspruchung jedoch vermutet werden, dass sich die Beanspruchung im Squash in den letzten Jahren ebenfalls verändert hat. Unter der Prämisse einer zufällig verteilten Ballwechseldauer kann bei Abnahme der durchschnittlichen Dauer der Ballwechsel auch eine Abnahme der Anzahl langer Ballwechsel und somit eine potentiell geringere durchschnittliche Post-Belastung-Blutlaktatkonzentration sowie auf Basis der Sauerstoffkinetik eine reduzierte durchschnittliche Sauerstoffaufnahme vermutet werden. Allerdings sind vor dem Hintergrund einer sich ebenfalls verändert habenden möglicherweise einer durchschnittlich höheren Energieflussrate bedürftigen Aktivitätsstruktur gegensätzliche Entwicklungen nicht auszuschließen. Dennoch kann aus dem Längsschnitt der bisherigen Untersuchungen abgeleitet werden, dass die durchschnittliche Belastungsintensität im Squash vermutlich auch aktuell im intensiven bis hoch intensiven Bereich liegt.

Wie bereits angedeutet können bei näherer Betrachtung der bisherigen Datenlage zur Beanspruchung im Squash Unterschiede in Abhängigkeit des untersuchten Spielniveaus und Altersdurchschnitts mit jedoch nicht eindeutiger Tendenz festgestellt werden (s. Tabelle 5.3). Die meisten Studienergebnisse deuten in diesem Zusammenhang darauf hin, dass die durchschnittliche Herzfrequenz der Probanden im Vergleich unterschiedlicher Spielniveaus mit steigendem Spielniveau zunimmt, während die kardiale Ausbelastung mit steigendem Spielniveau tendenziell abnimmt (Blansky et al., 1993; Docherty et al., 1982; Mercier et al., 1987). Dabei scheint die unterschiedlich hohe durchschnittliche Herzfrequenz wesentlich durch das Durchschnittsalter des jeweiligen Probandenpools bedingt, während die kardiale Ausbelastung eine potentiell spielniveaucharakteristische Belastungsintensität widerzuspiegeln scheint. So fanden Reilly & Halsall (1994) bei Ligaspielern vergleichbaren Spielniveaus, aber unterschiedlichen Alters eine etwas geringere, aber prinzipiell vergleichbare kardiale Ausbelastung bei deutlich höherer durchschnittlicher Herzfrequenz seitens der jüngeren Spieler. Dies erscheint vor dem Hintergrund einer mit zunehmendem Alter abnehmenden maximalen Herzfrequenz und aeroben Leistungsfähigkeit plausibel (de Marees, 2003). Die Ergebnisse von Loots et al. (1983) deuten jedoch auf eine spielniveaunabhängige und somit sportartcharakteristische kardiale Ausbelastung

bei mit steigendem Spielniveau zunehmender metabolischer Ausbelastung hin und auch ein Vergleich der Ergebnisse von Todd et al. (1996) und Girard et al. (2007) suggeriert eine mit steigendem Spielniveau zunehmende metabolische Leistung und Ausbelastung, so dass die Datenlage diesbezüglich bisher nicht eindeutig erscheint. Es kann jedoch generell vermutet werden, dass die Unterschiede hinsichtlich der Beanspruchung Resultat einer in Abhängigkeit des Spielniveaus respektive der Spielstärke verschiedenen körperlichen Leistungsfähigkeit sind, die ihrerseits als Konsequenz spezifischer Adaptionen an ein spielniveauspezifisches Belastungsniveau und Trainingspensum zu interpretieren ist (s. Kapitel 3). Unter der Annahme einer mit steigendem Spielniveau potentiell überproportional zur Belastung im Spiel zunehmenden aeroben Leistungsfähigkeit (s. Kapitel 5.5) kann auf Grundlage der meisten Ergebnisse der bisherigen Studien bei Interpretation der Sauerstoffaufnahme als ein physiologisches Äquivalent der metabolischen Leistung unter der Prämisse eines vergleichbaren Verhaltens von Herzfrequenz und Sauerstoffaufnahme mit steigendem Spielniveau eine höhere metabolische Leistung bei abnehmender physischer Ausbelastung abgeleitet werden.

Zur Post-Belastung-Blutlaktatkonzentration existieren bislang nicht genügend Daten, um konkrete Aussagen über eine eventuelle Abhängigkeit vom Spielniveau treffen zu können. Allerdings deuten die Ergebnisse von Leyk et al. (1996) darauf hin, dass für die durchschnittliche Post-Belastung-Blutlaktatkonzentration keine systematischen Unterschiede in Abhängigkeit des Spielniveaus existieren und die Blutlaktatkonzentration somit entweder eine sportartcharakteristische oder unsystematische, von einzelnen Aktionen oder Ereignissen abhängige Größe darstellt. Da die Ergebnisse von Girard et al. (2007) wie bereits beschrieben eine Abhängigkeit der Post-Belastung-Blutlaktatkonzentration von der Anzahl langer Ballwechsel postulieren und unter der Prämisse einer mit steigendem Spielniveau zunehmenden durchschnittlichen Ballwechseldauer bei zufälliger Häufigkeitsverteilung auch eine steigende Anzahl langer Ballwechsel angenommen werden kann, kann auf Basis dieser Argumentation prinzipiell auch eine Zunahme der Post-Belastung-Blutlaktatkonzentration mit steigendem Spielniveau vermutet werden. Diese Vermutung erscheint durch die bisher für unterschiedliche Spielniveaus berichteten Blutlaktatkonzentrationen gestützt.

Die bislang einzige Untersuchung zur Beanspruchung im Squash in Abhängigkeit von Sieg und Niederlage stammt von Alvero Cruz et al. (2009). Sie konnten zeigen, dass bei erfahrenen Squashspielern undefinierten Spielniveaus die durchschnittliche Beanspruchung bei den Gewinnern eines Spiels gemessen an der Post-Match-Blutlaktatkonzentration ($3,41 \text{ mmol l}^{-1}$ zu $6,64 \text{ mmol l}^{-1}$), der durchschnittlichen Herzfrequenz (167 bpm zu 175 bpm) und dem subjektiven Beanspruchungsempfinden (5,5 zu 7,6 Punkte auf der modifizierten Borgskala bis 10) deutlich niedriger ist als bei den Verlierern. Unter der Prämisse einer vergleichbaren körperlichen Leistungsfähigkeit

von Gewinnern und Verlierern (s. Kapitel 5.5 und 5.6) lässt sich auch unter Berücksichtigung der vermuteten Unterschiede hinsichtlich der Belastung in Abhängigkeit von Sieg und Niederlage (s. Kapitel 5.1) eine höhere Beanspruchung insbesondere in Folge einer höheren Anzahl maximal intensiver Aktionen seitens der Verlierer vermuten. Dabei ist auf Grund eines durch das Zurückliegen im Spiel potentiell höheren Stresslevels seitens der Verlierer insbesondere eine höhere kardiale Beanspruchung zu erwarten, welche sich in einer höheren durchschnittlichen kardialen Ausbelastung und innerhalb altershomogener Spielpaarungen auch in einer durchschnittlich höheren Herzfrequenz ausdrücken könnte.

Tabelle 5.2 enthält die wesentlichen Ergebnisse zur Beanspruchung im Herrensquash von 1973 bis 2009.

Tabelle 5.3: Forschungsergebnisse zur Beanspruchung im Herrensquash.

Autor(en)	Probanden	rel $\dot{V}O_2$ [$\text{ml kg}^{-1} \text{min}^{-1}$]	% $\dot{V}O_{2\text{max}}$ [%]	HR [bpm]	% HR _{max} [%]	BLC [mmol l^{-1}]
Blansky et al. 1973	25 Ligaspieler (middle-aged)	-	-	150	84	-
Blansky et al. 1973	25 Elitespieler	-	-	160	82	-
Beaudin et al. 1978	10 Ligaspieler (Alter: 20 – 53)	-	-	155	77,2	1,36
Montpetit et al. 1977	12 Elitespieler	35	62,5	167	85	-
Docherty et al. 1982	9 Ligaspieler (middle-aged)	-	-	154	88	-
Docherty et al. 1982	9 Elitespieler	-	-	162	83	-
Loots et al. 1983	10 Freizeitspieler	-	68,8	167,2	87	-
Loots et al. 1983	10 Ligaspieler	-	75,7	160,2	86,3	-
Mercier et al. 1987	172 Spieler (medium-skill)	-	-	-	86	-
Mercier et al. 1987	159 Spieler (high-skill)	-	-	-	82	-
Montpetit et al. 1987	162 Spieler (medium-skill)	-	51 – 57	147	78	-
Reilly & Halsall 1994	7 Ligaspieler (Alter: $\varnothing 22,4$)	-	-	163	82,4	-
Reilly & Halsall 1994	7 Ligaspieler (Alter: $\varnothing 42,4$)	-	-	150	84,6	-
Todd et al. 1996	12 Ligaspieler (Alter: $\varnothing 33,10$)	42,2	75	160	-	2,9
Leyk et al. 1996	16 Ligaspieler (Bezirks- bis Bundesliga)	-	-	180 – 185	-	6,3
Girard et al. 2007	7 Elitespieler (Alter: $\varnothing 24,9$)	54,4	86	177	92	8,3
Alvero Cruz et al. 2009	13 erfahrene Spieler (Alter: $\varnothing 31,93$)	-	-	171	-	~ 5

Durchschnittliche relative Sauerstoffaufnahme (rel $\dot{V}O_2$), durchschnittliche Sauerstoffaufnahme in Prozent der maximalen Sauerstoffaufnahme (% $\dot{V}O_{2\text{max}}$), durchschnittliche Herzfrequenz (HR), durchschnittliche Herzfrequenz in Prozent der maximalen Herzfrequenz (%HR_{max}), durchschnittliche Blutlaktatkonzentration am Satzende (BLC).

5.2.1 Hypothesen zur Beanspruchung im Squash

Vor dem dargestellten Forschungshintergrund wurden die nachfolgenden Hypothesen formuliert.

H 2.1 Die durchschnittliche Beanspruchung im Squash entspricht auch aktuell einer durchschnittlichen physischen Ausbelastung im mind. intensiven Bereich.

Hypothesen zur Beanspruchung in Abhängigkeit des Spielniveaus

H 2.2 Es existieren Unterschiede hinsichtlich der Beanspruchung in Abhängigkeit des Spielniveaus.

H 2.2.1 Die durchschnittliche Sauerstoffaufnahme ist spielniveautrennend und nimmt mit steigendem Spielniveau zu. Die durchschnittliche Sauerstoffaufnahme ist Squash national höher als Squash regional.

H 2.2.2 Die Post-Belastung-Blutlaktatkonzentration ist spielniveautrennend und nimmt mit steigendem Spielniveau zu. Die durchschnittliche Post-Belastung-Blutlaktatkonzentration ist Squash national höher als Squash regional.

H 2.2.3 Die durchschnittliche physischen Ausbelastung während eines Squashspiels ist spielniveautrennend. Die durchschnittlichen Sauerstoffaufnahme und Herzfrequenz in sind in Relation zu den Maximalwerten Squash national geringer als Squash regional.

Hypothesen zu Unterschieden zwischen Gewinnern und Verlierern

H 2.3 Es existieren Unterschiede hinsichtlich der Beanspruchung von Gewinnern und Verlierern.

H 2.3.1 Die durchschnittliche Sauerstoffaufnahme ist bei Gewinnern geringer als bei Verlierern.

H 2.3.2 Die durchschnittliche kardiale und metabolische Ausbelastung sind bei Gewinnern geringer als bei Verlierern.

H 2.3.3 Die durchschnittliche Post-Belastung-Blutlaktatkonzentration ist bei Gewinnern geringer als bei Verlierern.

5.3 Energiebereitstellung im Squash

Durch die Erfindung portabler Spiroergometrieeräte rückt zunehmend auch die Bestimmung des Energiebedarfs und insbesondere der Beteiligung der verschiedenen Energiestoffwechsel an der Energiebereitstellung bei sportlicher Belastung (s. Kapitel 6.2) in den Mittelpunkt der aktuellen Forschung. Jedoch wurde bereits von Montpetit et al. (1977) der erste Versuch unternommen, anhand der per Douglas-Bags direkt gemessenen Sauerstoffaufnahme die insgesamt (aerob) bereitgestellte Energiemenge zu quantifizieren (s. Kapitel 5.2). Basierend auf einer bei 12 Elitespielern gemessenen durchschnittlichen Sauerstoffaufnahme von $35 \text{ ml kg}^{-1} \text{ min}^{-1}$ ließ sich ein durchschnittlicher Energieumsatz¹ von insgesamt 3380 kJ h^{-1} äquivalent zu ungefähr einer Stunde mäßig intensiven Laufens berechnen (Montpetit et al., 1990). 1987 konnte in einer Neuauflage der Untersuchung von 1977 mit 32 Hobbyspielern ein Energieumsatz von 2829 kJ h^{-1} und somit eine mögliche Abhängigkeit dessen vom Spielniveau festgestellt werden (Montpetit et al., 1987). Aus der von Todd et al. (1996) für 12 County-Level-Spieler per kontinuierlicher Atemgasmessung bestimmten durchschnittliche Sauerstoffaufnahme von $42,2 \text{ ml kg}^{-1} \text{ min}^{-1}$ wurde ein mit Montpetit et al. (1977) vergleichbarer Energiebedarf von $60,7 \text{ kJ min}^{-1}$ berechnet.

Die aktuellste Abschätzung des Energiebedarfs während eines Squashspiels stammt

¹Mit Energieumsatz ist im Folgenden stets der der Arbeitsform zuzuordnende Nettoenergieumsatz gemeint.

von Girard et al. (2007). Sie stellten für englische Elitespieler einen per indirekter Kalorimetrie basierend auf der akkumulierten Sauerstoffaufnahme eines durchschnittlichen Satzes berechneten Energieumsatz von 4933 kJ h^{-1} fest. Eine differenzierte Berechnung der Beiträge der einzelnen Energiestoffwechsel an der Energiebereitstellung im Squash wurde bis dato nicht vorgenommen. Allerdings wird auf Grundlage einer bei Girard et al. (2007) gemessenen durchschnittlichen Sauerstoffaufnahme von 87 % der $\dot{V}O_{2\text{max}}$, einer durchschnittlichen Herzfrequenz von 92 % der HR_{max} und Post-Belastung-Blutlaktatkonzentrationen von durchschnittlich $8,3 \text{ mmol l}^{-1}$ bisher davon ausgegangen, dass die Energiebereitstellung im Squash zwar vorwiegend aerob erfolgt, vor allem die hohen Post-Belastung-Blutlaktatkonzentration jedoch auf eine hohe Beteiligung der anaeroben Energiestoffwechsel und insbesondere der anaerob laktaziden Komponente hinweisen könnten (Wilkinson et al., 2012). Basierend auf den bisherigen Ergebnissen zu Beanspruchung und Energiebereitstellung im Squash könnte ohne Berücksichtigung der intermittierenden Belastungsstruktur nach dem Modell von Neumann (1984) zur Einteilung spezieller Ausdauerarten eine Beteiligung der anaeroben Energiestoffwechsel von bis zu 20 % vermutet werden. Bei Vergleich der Blutlaktatkonzentration solcher Dauerbelastungen mit den von Girard berichteten Werten sowie unter Berücksichtigung der intermittierenden Belastungsstruktur kann jedoch eine noch höhere Beteiligung der anaeroben Energiestoffwechsel unterstellt werden. Studien zur Energiebereitstellung bei hoch bis maximal intensiver intermittierender Belastung mit mit Squash vergleichbarer zeitlicher Belastungsstruktur deuten jedoch auf einen auf Grund enzymatischer Hemmung potentiell geringen Beitrag des anaerob laktaziden Energiestoffwechsels an der gesamten Energiebereitstellung im Squash hin (s. Kapitel 6.2.5). Betrachtet man darüber hinaus die ballwechselinterne Belastungsstruktur, so ist hier zusätzlich ein ständiger Wechsel von sehr kurzen Aktionen maximaler Intensität und Repositionierungsphasen geringer Intensität zu beobachten. Unter Berücksichtigung dieser den definitorischen Belastungsphasen inkludierten Intensitätsveränderungen erscheint die Annahme gerechtfertigt, dass die Energiebereitstellung im Squash dominant aerob erfolgt, die für kurzzeitige hoch bis maximal intensive Belastungen unmittelbar benötigte Energie anaerob alaktazid gewonnen und in Abhängigkeit der aeroben Leistungsfähigkeit innerhalb der Erholungsphasen aerob resynthetisiert wird. In diesem Fall könnten die bei Girard et al. (2007) gefundenen, in Vergleich zu den zuvor publizierten Daten sehr hohen Blutlaktatkonzentrationen Folge einer im Vergleich gesteigerten Anzahl einzelner, sehr langer Ballwechsel sein, in deren Konsequenz die anaerob alaktazide Leistungsfähigkeit temporär reduziert wird (Montpetit et al., 1990; Girard et al., 2007). Diese Vermutung wird durch einen Vergleich der berichteten durchschnittlichen Länge der Ballwechsel bei Girard et al. (2007) mit denen anderer Studien gestützt.

Die Untersuchung zu Belastung und Beanspruchung im Squash zeigen eine Zunahme von Belastung und Beanspruchung mit steigendem Spielniveau (s. Kapitel 5.1, 5.3). Interpretiert als Beanspruchung über die Zeit scheint folglich auch ein positiver Zusammenhang von Spielniveau und metabolischer Leistung zu bestehen. Diese Vermutung wird neben den Untersuchungen von Montpetit et al. (1977; 1987) auch durch Studien aus anderen Rückschlagsportarten gestützt. Coad et al. (1979) bestimmten im Badminton bei Hobbyspielern einen Energiebedarf von 31 kJ min^{-1} , wohingegen bei Ligaspielern ein Energiebedarf von 44 kJ min^{-1} festgestellt wurde. Unter der Prämisse einer mit dem Spielniveau trotz vergleichbarer Anzahl maximal intensiver Aktionen (s. Kapitel 5.1) steigenden metabolischen Leistung bei abnehmender physischer Ausbelastung bei jedoch potentiell steigender durchschnittlicher Post-Belastung-Blutlaktatkonzentration (s. Kapitel 5.2) ist mit steigendem Spielniveau zwar absolut eine größere anaerob laktazide bereitgestellte Energiemenge zu erwarten, die jedoch anteilig durch das steigende aerob dominierte Gesamtvolumen relativiert erscheint.

Es existieren bislang keine Studien, die die Energiebereitstellung in Abhängigkeit von Sieg und Niederlage untersucht haben. Jedoch lassen die Ergebnisse zur Belastung (s. Kapitel 5.1) sowie die Resultate zur Beanspruchung in Abhängigkeit von Sieg und Niederlage (s. Kapitel 5.2) vermuten, dass die metabolische Leistung sowie der Beitrag des anaerob laktaziden Energiestoffwechsels bei Verlieren größer ist als bei Gewinnern. Tabelle 5.4 enthält die bisherigen Ergebnisse zur Energiebereitstellung in Racketsportarten.

Tabelle 5.4: Energiebereitstellung in Racketsportarten.

Autor(en)	Sportart	Probanden	W_{AER}	W_{PCr}	W_{BLC}
Montpetit et al. 1977	Squash	12 Elitespieler	3380	-	-
Coad et al. 1979	Badminton	Hobbyspieler	1860	-	-
Coad et al. 1979	Badminton	Ligaspieler	2640	-	-
Montpetit et al. 1987	Squash und Racquetball	32 Hobbyspieler	2820	-	-
Todd et al. 1996	Squash	12 Spieler der Ulster Top 20	3642	-	-
Girard et al. 2007	Squash	7 Elitespieler	4933	-	-
Zagatto et al. 2016	Tischtennis	11 erfahrene Spieler	$834,6^a$	$19,3^a$	$8,4^a$

^a: Angabe in kJ. Aerob (W_{AER} [kJ h^{-1}]), anaerob alaktazid (W_{PCr} [kJ h^{-1}]) und anaerob laktazid bereitgestellte Energiemenge (W_{BLC} [kJ h^{-1}]).

5.3.1 Hypothesen zur Energiebereitstellung im Squash

Auf Basis des vorgestellten Forschungshintergrundes wurden die nachfolgenden Hypothesen formuliert.

Hypothesen zur Energiebereitstellung im Squash

- H 3.1 Unterstützt durch anaerobe, hauptsächlich anaerob alaktazide Energiebereitstellungsprozesse erfolgt die Energiebereitstellung im Squash dominant aerob. Der Anteil des aeroben Energiestoffwechsels an der Energiebereitstellung ist größer als der der anaeroben Energiestoffwechsel.
- H 3.2 Der Anteil des anaerob alaktaziden Energiestoffwechsels an der Energiebereitstellung ist größer als der des anaeroben laktaziden Energiestoffwechsels.

Hypothesen zur Energiebereitstellung in Abhängigkeit des Spielniveaus

- H 3.3 Es existieren Unterschiede in der Energiebereitstellung in Abhängigkeit des Spielniveaus.
- H 3.3.1 Der Energiebedarf ist spielniveautrennend und nimmt mit steigendem Spielniveau zu. Die metabolische Leistung ist Squash national größer als Squash regional.
- H 3.3.2 Die Beteiligung des aeroben Energiestoffwechsels an der Energiebereitstellung ist spielniveautrennend und nimmt mit steigendem Spielniveau zu. Die anteilig aerobe bereitgestellte Energiemenge ist Squash national größer als Squash regional.

Hypothesen zu Unterschieden hinsichtlich der Energiebereitstellung von Gewinnern und Verlierern

- H 3.4 Es existieren Unterschiede in der Energiebereitstellung von Gewinnern und Verlierern.
- H 3.4.1 Die insgesamt benötigte Energiemenge und die metabolische Leistung sind bei Verlierern größer als bei Gewinnern.
- H 3.4.2 Der anaerob laktazid bereitgestellte Energiebetrag ist bei Verlierern größer als bei Gewinnern. Es existieren keine Unterschiede hinsichtlich der insgesamt benötigten Energiemenge, der metabolischen Leistung sowie der anteiligen Energiebereitstellung bei Gewinnern und Verlierern.

5.4 Veränderungen im Spielverlauf im Squash

Die Studie von Girard et al. (2007) ist bislang die einzige, die im Squash die Veränderungen der Beanspruchung im Spielverlauf untersucht hat. Unabhängig von Sieg und Niederlage fanden Girard et al. (2007) dabei gegenläufige Veränderungen von Sauerstoffaufnahme und Herzfrequenz. Sie stellten im Vergleich von drei Sätzen eine kontinuierliche Zunahme der durchschnittlichen Herzfrequenz von 172 auf 180 bpm bei ebenfalls kontinuierlicher Abnahme der durchschnittlichen Sauerstoffaufnahme von 57 auf 52 ml kg⁻¹ min⁻¹, abnehmender Blutlaktatproduktion und

vergleichbarem respiratorischen Quotienten fest. So kann aus den Daten von Girard et al. (2007) basierend auf einer darüber hinaus zu beobachtenden sukzessiven Zunahme von Atemfrequenz und Ventilation bei abnehmender Sauerstoffaufnahme insgesamt eine ermüdungsbedingte Reduktion der Herzkreislaufökonomie und eine damit einhergehende Abnahme der metabolischen Leistung bei abnehmender anaerob laktazider Energiebereitstellung abgeleitet werden. Unter der Prämisse lediglich fraktionaler Wiederauffüllung der Kreatinphosphatspeicher in den Erholungsphasen bei generell hoher Beteiligung des anaerob alaktaziden Energiestoffwechsels kann insgesamt eine Abnahme der anteilig anaerob bereitgestellten Energiemenge bzw. eine zunehmende Dominanz des anaeroben Energiestoffwechsels im Spielverlauf vermutet werden. Allerdings interpretieren Girard et al. (2007) die überproportional hohe Zunahme der durchschnittlichen Herzfrequenz im Spielverlauf als durch eine flüssigkeitsverlustinduzierte Hypovolämie bedingt und führen diese somit vornehmlich auf die Methodik zurück. Denn aus technischen Gründen war es den Spielern nicht erlaubt, in den Satzpausen zu trinken. Darüber hinaus weisen die Ergebnisse von Girard et al. (2007) darauf hin, dass keine systematischen Veränderungen im Spielverlauf hinsichtlich der zeitliche Belastungsstruktur existieren. Eine Untersuchung der Aktivitätsstruktur hinsichtlich potentieller Veränderungen im Spielverlauf ist bis dato nicht bekannt. Allerdings kann auf der Grundlage einer sich wie bei Girard et al. (2007) beschriebenen systematischen Veränderung der Beanspruchung bei vergleichbarer zeitlicher Belastung im Spielverlauf eine Belastungsreduktion in Form einer verminderten Aktionsrate vermutet werden.

5.4.1 Hypothesen zu Veränderungen im Spielverlauf

Vor dem dargestellten Forschungshintergrund wurden die nachfolgenden Forschungshypothesen formuliert.

- H 4.1 Die metabolische Leistung nimmt im Spielverlauf ab.
- H 4.2 Die Herzkreislaufökonomie nimmt im Spielverlauf ab. Im Vergleich der durchschnittlichen Herzfrequenz, Atemfrequenz und Ventilation mit der durchschnittlichen Sauerstoffaufnahme der einzelnen Sätze ist eine im Vergleich zur durchschnittlichen Sauerstoffaufnahme überproportionale Zunahme der anderen Parameter festzustellen.
- H 4.3 Die Beteiligung der anaeroben Energiestoffwechsel an der Energiebereitstellung nimmt im Spielverlauf ab.
- H 4.4 Unter der Prämisse einer im Spielverlauf abnehmenden metabolischen Leistung ist auch eine Reduktion der Belastung beispielsweise in Form einer geringeren Aktionsrate festzustellen.

5.5 Aerobe Leistungsfähigkeit im Squash

Aus physiologischer Perspektive werden die aerobe Leistungsfähigkeit und insbesondere die Leistungsfähigkeit an der anaeroben Schwelle häufig als primäre leistungslimitierende Faktoren im Squash genannt. Schon in den 1980er Jahren wurde vermutet, dass Squashspieler insbesondere so trainiert sein müssen, dass sie möglichst spät die anaerobe Schwelle erreichen, da ein Überschreiten der anaeroben Schwelle im Spiel als nachteilig eingeschätzt wurde (Haymann & Meseck, 1989). Seit den 1970er Jahren wurde innerhalb einer Vielzahl von Studien die aerobe Leistungsfähigkeit von Squashspielern unterschiedlicher Spielniveaus untersucht. Der am häufigsten in diesem Kontext per spiroergometrischer Untersuchungen, Shuttle-Run-Tests oder squashspezifischer Stufentests bestimmte Leistungsparameter ist die maximale Sauerstoffaufnahme, welche teilweise durch zusätzliche Betrachtung der Sauerstoffaufnahme sowie der Herzfrequenz an der anaeroben Schwelle bzw. dem respiratorischen Kompensationspunkt² ergänzt wurde. Leistungsdiagnostische Untersuchungen zur aeroben Leistungsfähigkeit im Squash fanden eine durchschnittliche maximale Sauerstoffaufnahme von 44 bis 64 ml kg⁻¹ min⁻¹ bei maximalen Herzfrequenzen zwischen 177 und 197 bpm (s. Tabelle 5.5). Sharp (1998) verweist in einer Review auf Werte von mehr als 65 ml kg⁻¹ min⁻¹. Die wenigen Studien, die die Sauerstoffaufnahme und Herzfrequenz an der anaeroben Schwelle untersucht haben, berichten eine zur anaeroben Schwelle korrespondierende Sauerstoffaufnahme von 60 % bis zu mehr als 90 % der $\dot{V}O_{2\max}$ und eine Schwellenherzfrequenz zwischen 88 % und 95 % der HR_{max} (Chin et al., 1995; Sharp, 1998; Bunc & Süss, 2004; Girard et al., 2007).

Aus dem Vergleich der Resultate vorheriger Studien kann eine Abhängigkeit der aeroben Leistungsfähigkeit von Alter und Spielniveau abgeleitet werden. Beispielsweise fanden Reilly & Halsall (1994) bei Spielern gleichen Spielniveaus starke Unterschiede in Abhängigkeit des Alters. So war die maximale Sauerstoffaufnahme bei jüngeren Spielern (Alter: \bar{x} 22,4 Jahre) um ~ 10 ml kg⁻¹ min⁻¹ höher als bei älteren Spielern (Alter: \bar{x} 42,4 Jahre), was jedoch vor dem Hintergrund einer bei Männern ab dem 30 Lebensjahr sukzessiv abnehmenden maximalen Sauerstoffaufnahme plausibel erscheint (s. Kapitel 6.1.1). Mellor et al. (1995) konnten darüber hinaus in einem Vergleich der aeroben Leistungsfähigkeit von Spielern dreier Spielniveaus vergleichbaren Alters zeigen, dass die Sauerstoffaufnahmefähigkeit mit steigendem Spielniveau zunimmt und vermuteten als Ursache eine mit steigendem Spielniveau zunehmende Trainings- und Wettkampffrequenz sowie eine höhere Belastungsintensität im Wettkampf. So war die zu einer Herzfrequenz von 170 bpm korrespondierende

²Die Begriffe anaerobe Schwelle und respiratorischer Kompensationspunkt werden auf Grund ihrer kausalen Verknüpfung nachfolgend nicht weiter differenziert, sondern unter dem Begriff der anaeroben Schwelle zusammengefasst.

Sauerstoffaufnahme bei Nationalspielern mit $55,8 \text{ ml kg}^{-1} \text{ min}^{-1}$ um $\sim 9 \%$ höher als bei in Ligabetrieben agierenden Amateurspielern und $\sim 22 \%$ höher als bei regelmäßig spielenden Hobbyspielern. Jedoch weist ein Vergleich des durchschnittlichen Alters der Probanden der Studien, die einen Vergleich unterschiedlicher Spielniveaus vorgenommen haben, neben Unterschieden hinsichtlich der aeroben Leistungsfähigkeit auch auf eine negative Korrelation von Alter und Spielniveau hin.

Unabhängig von Alter und Spielniveau kommen jedoch alle Studien zu dem Ergebnis, dass Squashspieler gemessen an ihrer maximalen Sauerstoffaufnahme generell über eine im Vergleich zum Bevölkerungsquerschnitt gute bis exzellente aerobe Leistungsfähigkeit verfügen, so dass davon ausgegangen werden kann, dass die aerobe Leistungsfähigkeit für die Sportart Squash alters- und spielniveauunabhängig von zentraler Bedeutung ist. Hierbei scheint erwähnenswert, dass sich bei Vergleich der Studienergebnisse von vor und nach Änderung des Regelwerkes keine nennenswerten Veränderungen der aeroben Leistungsfähigkeit feststellen lassen. Die Studie von Girard et al. (2005) weist jedoch prinzipiell auf eine Abhängigkeit der publizierten Ergebnisse zur maximalen Sauerstoffaufnahme von der jeweils angewandten Messmethode hin. So konnte in einem squashspezifischen Stufentest auf dem Court bei denselben Probanden eine 16% höhere maximale Sauerstoffaufnahme als innerhalb einer klassischen Laufbandspiroergometrie festgestellt werden.

Bisher existiert keine Studie, die einen Vergleich der aeroben Leistungsfähigkeit von Gewinnern und Verlierern eines Squashspiels untersucht hat. Da die zeitliche Belastungsstruktur innerhalb eines Spiels für beide Spieler einer Begegnung identisch ist, sich darüber hinaus bisher keine wesentlichen Unterschiede hinsichtlich der Belastung von Gewinnern und Verlierern feststellen lassen konnten (s. Kapitel 5.1) und die spezifische Physis wie aufgezeigt aus den Anforderungen des Spiels resultiert (s. Kapitel 3), kann vermutet werden, dass diesbezüglich keine systematischen Unterschiede existieren. Tabelle 5.5 gibt einen Überblick bisheriger Forschungsergebnisse zur aeroben Leistungsfähigkeit von Squashspielern.

Tabelle 5.5: Aerobe Leistungsfähigkeit im Herrensquash.

Autor(en)	Probanden	$\dot{V}O_{2max}$ [ml kg ⁻¹ min ⁻¹]	$\dot{V}O_{2ANS}$ [ml kg ⁻¹ min ⁻¹]	HR _{max} [bpm]	HR _{ANS} [bpm]
Loots & Thiaert 1983	20 Ligaspieler	56,2	-	192,3	-
Montpetit et al., 1987	16 Spieler (medium-skilled)	55	-	185	-
Sharp 1990	Review	bis 65 und mehr	60 bis > 80 ^a	-	-
Reilly & Halsall 1994	7 Ligaspieler (Alter: Ø22,4)	58,8	-	197,81	-
Reilly & Halsall 1994	7 Ligaspieler (Alter: Ø42,4)	49,4	-	177,30	-
Chin et al. 1995	10 Nationalspieler	61,7	49,5	190,7	168,3
Hansen 1995	6 Ligaspieler	43,7	-	-	-
Mahoney & Sharp 1995	5 Elitespieler (Ø Alter: 16,8)	52,6	-	-	-
Mellor et al. 1995	13 Spieler regional	55,8	-	-	-
Todd & Mahoney 1995	12 Elitespieler	63,3	-	-	-
Brown et al. 1998	5 Nationalspieler (Alter: Ø24,9)	47,62	-	-	-
Brown et al. 1998	24 Jugendnationalspieler (Alter: Ø17,7)	61,02	-	-	-
Bunc & Süss 2004	16 Jugendnationalspieler	58,9	79,2 ^a	-	-
Girard et al. 2005	7 Nationalspieler (Alter: Ø24,9) ^b	54,9	45,8	194,8	167,8
Girard et al. 2005	7 Nationalspieler (Alter: Ø24,9) ^c	63,6	53,6	193,0	170,5
Ong et al. 2007	18 Nationalspieler (Alter: Ø18,3)	57,0	-	-	-
Wilkinson et al. 2012	7 Elitespieler	56,2	-	-	-
Krasilshchikov 2014	23 Jugendnationalspieler (Alter: 16 – 18)	48,01	-	-	-

^a: Angabe in Prozent der maximalen Sauerstoffaufnahme, ^b: gemessen per Laufbandspiroergometrie, ^c: gemessen per squashspezifischen Stufentest auf dem Court.

Maximale Sauerstoffaufnahme ($\dot{V}O_{2max}$), Sauerstoffaufnahme an der anaeroben Schwelle ($\dot{V}O_{2ANS}$), maximale Herzfrequenz (HR_{max}), Herzfrequenz an der anaeroben Schwelle (HR_{ANS}).

5.5.1 Hypothesen zur aeroben Leistungsfähigkeit Squash

H5 Aus dem dargestellten Forschungshintergrund wurden die nachfolgenden Hypothesen abgeleitet.

H 5.1 Squashspieler verfügen auch aktuell über eine gute bis exzellente aerobe Leistungsfähigkeit.

Hypothesen zur aeroben Leistungsfähigkeit in Abhängigkeit des Spielniveaus

H 5.2 Die aerobe Leistungsfähigkeit Squash ist spielniveautrennend und nimmt mit steigendem Spielniveau zu. Die maximale Sauerstoffaufnahme sowie die Sauerstoffaufnahme an der anaeroben Schwelle sind Squash national höher als Squash regional.

Hypothesen zu Unterschieden hinsichtlich der aeroben Leistungsfähigkeit von Gewinnern und Verlierern

H 5.3 Es existieren keine systematischen Unterschiede zwischen der maximalen Sauerstoffaufnahme sowie der Sauerstoffaufnahme an der anaeroben Schwelle von Gewinnern und Verlierern.

5.6 Motorische Fähigkeiten im Squash

Das Agieren aus möglichst zentraler Position innerhalb des dreidimensionalen Spielraums unter dem Leitbild maximal früher Balltreffpunkte zur Erhöhung der eigenen Spieldominanz bedingt besondere Anforderungen an die Bein- und Laufarbeit

des Squashspielers, die aus schnellen Richtungsänderungen sowie dem ständigen Wechsel von schnellen konzentrischen Beschleunigungsbewegungen und exzentrischen Abstoppbewegungen häufig unter hohem Zeitdruck und zum Teil sehr tiefen Ausfallschritten resultieren. Schnelle Drehungen und wiederholend dynamisches Schlagen aus unterschiedlich ausbalancierten Positionen stellen darüber hinaus hohe Anforderungen an einen möglichst gut harmonisierenden passiven und aktiven Bewegungsapparat (Meseck et al., 2003). Somit erscheinen im Squash vor dem Hintergrund der zeitlichen Belastungsstruktur verschiedene motorische Fähigkeiten potentiell bedeutsam zu sein. Dennoch existiert kein aktuelles Fitnessprofil Squash, welches die Bedeutung motorischer Fähigkeiten durch Betrachtung unterschiedlicher Spielniveaus im aktuellen Herrensquash bewertet. Die bisherigen Untersuchungen zur Fitness im Squash (Rensburg et al., 1982; Brooks et al., 1985; Read et al., 1990; Mahoney & Sharp, 1995; Chin et al., 1995; Wilkinson et al., 2012; Krasilshchikov, 2014) erscheinen größtenteils für den aktuellen Herrensquash nicht mehr repräsentativ. So vermuteten Wilkinson et al. (2012) auf Basis der Ergebnisse von Girard et al. (2007) eine Veränderung der Bedeutung der verschiedenen Aspekte der körperlichen Leistungsfähigkeit seit Änderung des Regelwerks. Duthie et al. (2003) konnten darüber hinaus feststellen, dass sich sportartunabhängig mit im Laufe der Zeit sukzessiv zunehmender Professionalisierung auch das Fitnesslevel der Spieler verändert, was den Eindruck einer veralteten Datenlage verstärkt. Über die geringe Aussagekraft veralteter Ergebnisse hinaus stellen sich viele Untersuchungen zur Fitness im Squash als nicht umfangreich genug dar, um differenzierte Aussagen zu erfolgsrelevanten motorischen Fähigkeiten machen zu können. Die bisher umfangreichste Untersuchung zur Fitness im aktuellen Squash stammt von Krasilshchikov (2014), in der malaysische Jugendnationalspieler hinsichtlich ihrer Beweglichkeit, Schnelligkeit, Kraft, Agilität und Ausdauer untersucht wurden. Jedoch scheint der Probandenpool dieser Studie keine Aussage über das charakteristische Fitnessniveau bzw. squashspezifisch bedeutsame motorische Fähigkeiten im Seniorenbereich zuzulassen.

Unabhängig von veränderten Regularien und aktuellen Entwicklungen wurden in Abhängigkeit der auftretenden Bewegungen und der intermittierenden Spielstruktur für die Sportart Squash die folgenden motorischen Fähigkeiten als potentiell bedeutend eingestuft (Rensburg et al., 1982; Sharp, 1990; Reilly & Halsall, 1995; Mahoney & Sharp, 1995; Chin et al., 1995; Müller et al., 2000; Meseck et al., 2003; Wilkinson et al., 2012, Krasilshchikov, 2014):

- Beweglichkeit,
- Koordination,
- Schnelligkeit,

- squashspezifische Agilität,
- Schnellkraft, Reaktivkraft und Kraftausdauer der unteren Extremitäten,
- Schnellkraftkraft und Kraftausdauer der oberen Extremitäten,
- aerobe und anaerobe Ausdauer und
- multiple Sprintfähigkeit.

Nachfolgend wird literaturbasiert eine Einschätzung der Bedeutung obiger Fähigkeiten für die Sportart Squash vorgenommen.

Im Squash scheint die Beweglichkeit vor allem hinsichtlich einer möglichst großen Reichweite bei Balltreffpunkten von Boden- bis Überkopfhöhe bedeutsam zu sein. Darüber hinaus kann sie indirekt zu einer Verbesserung von Technik und Koordination sowie der Ökonomisierung von Bewegungsabläufen beitragen (Meseck et al., 2003). Unabhängig von ihrer potentiellen Bedeutung für die unmittelbare Spielleistung wird eine hohe Beweglichkeit als für die Vermeidung muskulärer Dysbalancen und Reduktion der Verletzungsanfälligkeit als bedeutend eingestuft. Als wichtigste Größen für die Beweglichkeit im Squash gelten die Rumpfbeweglichkeit sowie die Beweglichkeit des Schultergürtels und der unteren Extremitäten (Meseck et al., 2003; Murray et al., 2016b). Die bisherigen Untersuchungen zur Beweglichkeit im Squash weisen auf eine potentiell hohe Bedeutung dieser hin. So konnten Chin et al. (1995) wie auch Krasilshchikov (2014) im Sit-and-Reach-Test eine als überdurchschnittliche einzustufende Beweglichkeit nachweisen.

Hinsichtlich der Bedeutung der koordinativen Fähigkeiten im Squash erfordert der Charakter eines Rückschlagspiels zunächst offensichtlich eine gute Hand-Auge-Koordination. Darüber hinaus stellen schnelle, kraftvolle Bewegungen in verschiedene Richtungen und daraus resultierende schnelle Lageveränderungen insbesondere hohe Anforderungen an die Gleichgewichtsfähigkeit. Ebenso bedarf das Spiel über alle Courtwände einer guten Orientierungsfähigkeit. Die Schlaghärtevariation im Kontext der Aneinanderreihung verschiedener Schlagtechniken erfordert eine gute Differenzierungsfähigkeit (Meseck et al., 2003). Darüber hinaus erscheint die Koordination von direktem leistungsphysiologischen Nutzen zu sein. Denn als Folge einer gezielteren Innervation der Skelettmuskulatur kann einerseits eine Ökonomisierung der Bewegungsabläufe und andererseits eine Reduzierung des Verletzungsrisikos beobachtet werden. Die bisherige Datenlage zur Bedeutung der Koordinationsfähigkeit im Squash lässt auf Grund fehlender Vergleichswerte keine eindeutige Beurteilung dieser zu (Mahoney & Sharp, 1995).

In Abhängigkeit der aus der Größe des Spielfeldes sowie der Basistaktik resultierenden kurzen bis sehr kurzen Distanzen, die es beim Squash in möglichst kurzer

Zeit zu bewältigen gilt, scheinen bezogen auf die Schnelligkeit die Antrittsschnelligkeit und die Beschleunigungsfähigkeit potentielle wichtige Aspekte der Leistungsfähigkeit zu sein, die ihrerseits auf einer ausreichend gut entwickelten Grundschnelligkeit als Entwicklungsgrundlage basieren (Meseck et al., 2003). Auch diesbezüglich ist die bisherige Datenlage nicht eindeutig. So weisen Chin et al. (1995) für Topspieler Hong Kongs auf eine mit einer guten Sprintfähigkeit assoziierte hohe anaerobe Leistungsfähigkeit hin, wohingegen Krasilshchikov (2014) bei malaysische Jugendnationalspieler im 30 m-Sprint erneut lediglich eine befriedigende Leistung feststellen konnte. Untersuchungen zur Antrittsschnelligkeit und Beschleunigungsfähigkeit sind nicht bekannt. Darüber hinaus scheint im Squash die Reaktionsschnelligkeit als Grundlage der Handlungsschnelligkeit eines Spielers eine bedeutende Rolle zu spielen. Dabei gilt es, auf den Schlag des Gegners möglichst schnell zu reagieren. Eine schnellere Reaktion ermöglicht dem Spieler eine physiologisch positive Verschiebung der Belastung-Pause-Relation in Richtung längerer Erholungsphasen und generiert potentiell einen Zeitgewinn zur situativ adäquaten Schlagauswahl. Im Kontext immer präziser gespielter Bälle scheint sie zunehmend auch notwendige Voraussetzung zu sein, um alle gegnerischen Bälle erreichen zu können. Eine Studie, in der die Reaktionsschnelligkeit von Squashspielern untersucht wurde ist nach eigenem Kenntnisstand nicht existent.

Die Anforderungen an die Schnelligkeit im Squash zeigen sich insbesondere hinsichtlich einer möglichst hohen spezifischen Bewegungsgeschwindigkeit, die ihrerseits sowohl Anforderungen an die energetischen und koordinativen Fähigkeiten stellt (Meseck et al., 2003). Somit scheint die Agilität auf Grund des durch schnell aufeinanderfolgende, kurze Antritte in verschiedene Richtungen, abrupte Stopps und Richtungswechsel dominierten Bewegungsbildes gerade unter den Aspekten Handlungsschnelligkeit und Bewegungsökonomie eine potentiell wesentliche Größe der Leistungsfähigkeit im Squash zu sein. Doch auch diesbezüglich erscheint die Datenlage bisher nicht eindeutig. Denn während Krasilshchikov (2004) eine lediglich durchschnittliche Agilität berichtet, weisen Wilkinson et al. (2012) im Kontext einer möglichst gut ausgebildeten Mehrfachsprinthfähigkeit auf eine potentiell hohe Bedeutung der Agilität hin.

Hinsichtlich der verschiedenen Krafftfähigkeiten scheinen für Squashspieler auf Grund des durch explosive, beschleunigende und abbremsende Krafftformen dominierten Bewegungsbildes der oberen Extremitäten beim Schlagen unter Berücksichtigung des Ballgewichts und der unteren Extremitäten bei tiefen Ausfallschritten, kurzen Antritten, Stopps und Richtungswechseln und der im Kontext einer im Spielverlauf möglichst konstanten Spielleistung notwendigen Fähigkeit, solche, sich häufig wiederholende Krafteinsätze zu bewältigen, die Schnellkraft, Reaktivkraft sowie die Kraftausdauer

der oberen und unteren Extremitäten bedeutsam zu sein (Meseck et al., 2003). Da sich im Spiel jedoch beobachtungsbasiert in der Regel ausreichend große zeitliche Abstände zwischen zwei schnellkräftigen Bewegungen ergeben, scheint die Schnellkraft potentiell bedeutsamer als die Kraftausdauer zu sein. Die bisherigen Ergebnisse zur Bedeutung der verschiedenen Kraftfähigkeiten im Squash sind bislang nicht eindeutig. Denn während beispielsweise Mahoney & Sharp (1995) für angehende Profispieler im Alter von ~ 17 Jahren eine überdurchschnittlich hohe Schnellkraft der unteren Extremitäten nachweisen konnten, stellte Krasilshchikov (2014) bei malaysische Jugendnationalspieler im Alter von 16 – 18 Jahren diesbezüglich lediglich ein befriedigendes Fähigkeitsniveau fest. Allerdings deuten die Ergebnisse von Krasilshchikov (2014) auf eine möglicherweise hohe Bedeutung einer gut ausgebildeten Schnellkraft der oberen Extremitäten hin. Unabhängig davon konnten Wilkinson et al. (2012) bei englischen Profispielern eine hohe Reaktivkraft der unteren Extremitäten nachweisen. Dies erscheint vor dem Hintergrund ständiger Wechsel von exzentrischer und konzentrischer Muskelarbeit beim Starten und Stoppen plausibel (Meseck et al., 2003).

Die azyklischen Bewegungsabläufe im Squash mit wiederkehrenden Bewegungsmustern erfordern generell eine azyklische Form der Ausdauer. Die bisherige Datenlage im Squash lässt wie dargestellt vermuten, dass vor allem die aerobe Ausdauerleistungsfähigkeit ein wichtiger Aspekt der squashspezifischen Leistungsfähigkeit ist (s. Kapitel 5.5). Daneben scheint auf Grund der intermittierenden Belastungsstruktur mit azyklisch wiederkehrenden hoch bis maximal intensiven Belastungen die Schnelligkeitsausdauer im Kontext einer hohen multiplen Sprintfähigkeit leistungsbestimmend zu sein. Diese ist abhängig von der anaerob alaktaziden Kapazität sowie deren Regeneration, die wiederum durch die aerobe Leistungsfähigkeit bestimmt ist (s. Kapitel 6.2.5).

Bislang existiert keine Studie, in der die Fitness im Squash in Abhängigkeit des Spielniveaus oder Sieg und Niederlage untersucht wurde. In diesem Kontext kann jedoch vermutet werden, dass es in Folge eines durch eine mit steigendem Spielniveau zunehmende Leistungsdichte begründeten Bedeutungsgewinns der Physis zu einer spezifischen Ausdifferenzierung erfolgsrelevanter motorischer Fähigkeiten kommt, wodurch sich die interindividuelle Variabilität der Ausprägung der untersuchten motorischen Fähigkeiten reduziert und somit zielgruppenspezifische physiologische Charakteristika herausbilden. Unter der Prämisse eines mit steigendem Spielniveau immer schneller werdenden Spiels scheinen alle genannten motorischen Fähigkeiten potentiell an Bedeutung zu gewinnen.

Systematische Unterschiede zwischen Gewinnern und Verlierern sind unter der Prämisse vergleichbarer physiologischer Anforderungen für Spieler vergleichbarer Spielstärke nicht zu erwarten.

5.6.1 Hypothesen zur Fitness im Squash

H6 Basierend auf den vorangestellten Erläuterungen wurden die nachfolgenden Hypothesen formuliert.

- H 6. 1 Neben einer exzellenten Ausdauer verfügen Squashspieler über einen mindestens guten Ausprägungsgrad von Beweglichkeit, Koordination, Schnelligkeit, Reaktionsschnelligkeit, Agilität, und Schnellkraft der unteren und oberen Extremitäten.

Hypothesen zur Fitness in Abhängigkeit des Spielniveaus

- H 6.2 Es existieren systematische Unterschiede hinsichtlich der Ausprägung der verschiedenen motorischen Fähigkeiten in Abhängigkeit vom Spielniveau.

Hypothesen zu Unterschieden hinsichtlich der Fitness von Gewinnern und Verlierern

- H 6.3 Es existieren keine systematischen Unterschiede hinsichtlich des Ausprägungsgrades der verschiedenen motorischen Fähigkeiten zwischen Gewinnern und Verlierern.

6 Theoretischer Hintergrund zur Methodik

6.1 Erstellen eines physiologischen Anforderungsprofils

Die Grundlage zur Erfassung der temporalen Belastungsstruktur sowie verschiedener Aktivitäten im Spiel bildet die quantitative Spielanalyse, die zusammen mit der qualitativen Spielanalyse den Bereich der Notational Analysis bildet. Bei der quantitativen Spielanalyse werden während oder nach Ende eines Spiels per manueller Notationssysteme oder mit Hilfe computerunterstützter Videoanalyse bestimmte beobachtbare Aspekte eines Spiels respektive einer Spilleistung numerisch erfasst und anschließend durch statistische Berechnungen quantitativ ausgewertet. Auf diese Weise ist es möglich, die temporale Belastungsstruktur (Dauer, Dichte, Umfang) sowie die Aktivitätsstruktur beispielsweise in Form von Häufigkeiten und Frequenzen (Aktionen pro Zeiteinheit im Referenzzeitraum) bestimmter Aktionen in unterschiedlichen Phasen eines Spiels zu bestimmen (Hughes & Franks, 2004). Für mehr Informationen zu der Entstehungsgeschichte, den unterschiedlichen Methoden sowie den verschiedenen Einsatzbereichen empfiehlt sich ein Blick in Hughes & Franks (2004).

Die Messung von Beanspruchung im Sinne körperlicher Leistung und Ausbelastung im Spiel sollte nach dem Vorbild verschiedener Untersuchungen u. a. zum Boxen, Karate, Tischtennis, Badminton (Beneke et al., 2004.; Kempter, 2008; Bussweiler, 2014; Davis et al., 2014; Zagatto et al., 2016) im Idealfall innerhalb eines regulären Wettkampfes oder aber innerhalb einer möglichst spielnahen Wettkampfsimulation durch die möglichst kontinuierliche oder engmaschige Registrierung aussagekräftiger physiologischer Parameter wie Atemgasparameter, Herzfrequenz und Blutlaktatkonzentration erfolgen. Dank portabler Spiroergometer und moderner Herzfrequenzuhren ist dies mittlerweile ohne große Beeinträchtigung der Spilleistung der Spieler im Feld möglich. Aus den erhobenen Daten können die Durchschnittswerte und die Spannweite der Beanspruchungsparameter bestimmt und der Ausbelastungsgrad, der Energieumsatz und -bedarf sowie die Art der Energiebereitstellung berechnet werden.

Die physiologische Komponente der Leistungsfähigkeit kann durch verschiedene sogenannte leistungsdiagnostische Tests und Verfahren erhoben werden. Dabei kommen je nach Aspekt der Zielstellung sowie zeitlichen und personellen Ressourcen u. a. apparative Messverfahren wie Kraftmessplatten oder Ergometrien und nichtapparative sportmotorische Tests zum Einsatz (Bös, 1998; Banzer, 2004).

Im Fokus der Leistungsdiagnostik steht auf Grund ihrer vielfach nachgewiesenen hohen Bedeutung für die Leistungsfähigkeiten insbesondere in Sportarten die

Beurteilung der aeroben Leistungsfähigkeit, die sich aus der kardio-respiratorischen und metabolischen Leistungsfähigkeit ergibt. Die korrekte Bestimmung der aeroben Leistungsfähigkeit erfordert eine sehr hohe bis maximale Beanspruchung des Körpers. Für eine möglichst exakte Messung dieser bietet sich eine Spiroergometrie mit Laktatdiagnostik im Labor oder unter Zuhilfenahme portable Spiroergometriesysteme im Feld an.

Als begrifflicher Zusammenschluss von Ergometrie¹ und Spirometrie² beschreibt die Spiroergometrie die Messung von respiratorischen Parametern während exakt dosierter und reproduzierbarer Belastung zur qualitativen und quantitativen Beurteilung der Reaktion des Herzkreislaufsystems und des Energiestoffwechsels auf muskuläre Arbeit (Hollmann et al., 2006). Gemessen werden dabei mittels einer mit einem Messgerät verbundenen luftdichten Atemgasmaske die endexpiratorische Sauerstoff- und Kohlendioxidkonzentration, das Atemvolumen und die Atemfrequenz. Basierend auf den erhobenen Daten werden die Sauerstoffaufnahme, die Kohlendioxidabgabe, der respiratorische Quotient und das Atemminutenvolumen berechnet, welche beispielsweise Aussagen über die physische Ausbelastung, körperliche Leistung, Bewegungsökonomie und die Energiebereitstellung ermöglichen. Eine schnelle und sinnvolle Auswertung der Daten sowie die Überprüfung ihrer Plausibilität kann mittels der sogenannten 9-Felder-Graphik erfolgen (Kroidl et al., 2007). Um eine differenzierte Betrachtung der körperlichen Leistungsfähigkeit zu erhalten, wird üblicherweise zusätzlich kontinuierlich die Herzfrequenz gemessen und zu festgelegten Zeitpunkten innerhalb der Vorbereitung, des Belastungszeitraumes und der Nachbelastungsphase punktuell Blut aus dem hyperämisierten Ohrläppchen oder der Fingerbeere zur späteren Analyse der belastungsspezifischen Blutlaktatkonzentration entnommen. Je nach Untersuchungsziel und Sportart ist innerhalb der Spiroergometrie ein spezifisches Belastungsprotokoll sowie ein spezifisches Ergometer zu wählen. Zur Bestimmung der maximalen Sauerstoffaufnahme als zentrale Prädikatorvariable der aeroben Leistungsfähigkeit haben sich in der Praxis sowohl rampenförmige als auch stufenförmige Belastungsprotokolle als ausreichend valide gezeigt und etabliert. Während Rampenprotokolle eine höhere Validität hinsichtlich der Bestimmung der Maximalwerte aufweisen, ermöglichen stufenförmige Belastungsprotokolle in Abhängigkeit der Stufenlänge bei zusätzlicher Laktatdiagnostik eine höhere Validität bezüglich der belastungsabhängigen Blutlaktatkonzentration. Dies beruht auf der Annahme, dass nach einer mind. 3 min langen Belastungsstufe einerseits eine Anpassung der Muskelzellen an die Energieanforderungen der aktuellen Belastung erfolgt und andererseits eine Laktatbestimmung im Steady-State möglich ist. Der Grad der individuellen Maximalbeanspruchung kann anhand verschiedener physiologischer

¹Ergometrie: Methode zur exakten Dosierbarkeit und Reproduzierbarkeit von körperlicher Belastung.

²Spirometrie: Atemgasanalyse unter Ruhebedingungen.

Parameter beurteilt werden. Diese sind als Ausbelastungskriterien zusammengefasst und ihre Grenzwerte für eine Ausbelastung klar definiert (s. Kapitel 11.1). Bei der Wahl des Ergometers ist mit Blick auf eine möglichst hohe Validität vor allem jedoch auf eine sportartspezifische Belastung zu achten. Neben den klassischen Fahrrad- und Laufbandergometern existiert mittlerweile eine Vielzahl weiterer Ergometer wie Ruder-, Handkurbel oder Kanuergometer (Friedmann-Bette, 2011).

Der Bestimmung der anaeroben Leistungsfähigkeit wird in der Praxis bisweilen eine untergeordnete Rolle zuteil. Da alle für anaerobe Energiestoffwechselprozesse benötigten Substrate bereits in der Muskelzelle vorliegen und eine direkte Messung der anaeroben Leistungsfähigkeit somit nur durch aufwendige Verfahren wie Muskelbiopsien erfolgen kann, haben sich in der Praxis spezielle indirekte Messverfahren zur Bestimmung der anaeroben Leistungsfähigkeit wie der Treppentest nach Margaria et al. (1966), der Wingate-Anaerobic-Test oder verschiedenen Sprinttests etabliert, innerhalb welcher die anaerobe Leistungsfähigkeit und Kapazität über die Dauer bis zur Ausbelastung oder durch submaximale oder maximale Blutlaktatkonzentrationen bestimmt wird. Heck & Schulz (2002) weisen jedoch auf verschiedene Schwächen der einzelnen Testverfahren hin und führen vor Augen, dass eine nicht invasive Erfassung der anaeroben Leistungsfähigkeit kaum möglich ist, da eine differenzierte Beurteilung der beiden anaeroben Energiestoffwechsel und des Beitrages der aeroben Komponente auf Grund ihrer wechselseitigen Beeinflussung nicht eindeutig erfolgen kann.

Sportmotorische Tests sind wissenschaftliche Routineverfahren zur Bestimmung eines oder mehrerer theoretisch definierbarer und empirisch abgrenzbare Persönlichkeitsmerkmale bzgl. des individuellen, allgemeinen oder speziellen motorischen Fähigkeitsniveaus (Bös, 1987). Sie bestehen aus Bewegungsaufgaben, bei denen die Testpersonen aufgefordert werden, das im Sinne der Aufgabenstellung bestmögliche Ergebnis zu erzielen. Die gemessenen Daten lassen über den Vergleich mit offiziellen Leistungsnormen sowie interindividuellen Vergleich der Ergebnisse innerhalb einer Bezugsgruppe eine Bewertung des individuellen Ausprägungsgrades der jeweils gemessenen motorischen Fähigkeit in Form einer quantitativen Aussage zu. Darüber hinaus kann mittels sportmotorischer Tests durch strukturierte Mehrfachtestung einer Person (mind. drei Testungen über einen Zeitraum von ein bis zehn Jahren) deren intraindividuelle Entwicklungsprozess beispielsweise im Kontext der Beurteilung der Effizienz von Trainingsmaßnahmen nachvollzogen werden (Banzer et al., 2004; Oberger, 2014).

Bei der Erstellung eines Fitnessprofils einer Sportart sollte die Auswahl der jeweiligen motorischen Tests theoriegeleitet mit Blick auf für die jeweilige sportliche Leistung potentiell bedeutsame motorische Fähigkeiten erfolgen. Zur Erzielung aussagekräftiger Ergebnisse ist bei der Testauswahl auf die Einhaltung der Gütekriterien (Objektivität,

Reliabilität, Validität) sowie die Durchführbarkeit unter Standardbedingungen, eine möglichst hohe Vergleichbarkeit der Ergebnisse und die Existenz von Bezugsnormen zu achten. Dies ist in der Regel bei wissenschaftlich fundierten, evaluierten und standardisierten Verfahren gegeben, die bei häufiger Anwendung in der wissenschaftlichen Praxis als Basisverfahren bezeichnet werden. Eine Übersicht über 22 Basistests lässt sich in Bös (2001) finden. Darüber hinaus ist im Kontext einer möglichst hohen Praktikabilität eine optimale Relation von Einfachheit, Dauer und Kosten anzustreben (Oberger, 2014). Eine umfassende Übersicht verschiedener sportmotorischer Tests bietet Oberger (2014).

Einzelne sportmotorische Tests werden häufig zu einer aus mehreren Einzeltests bestehenden homogenen oder heterogenen sportmotorischen Testbatterie zusammengeschlossen. Während bei homogenen Testbatterien die Testzusammenstellung so erfolgt, dass eine Eigenschaft (z. B. Schnellkraft) durch verschiedene Einzeltests mit mäßiger bis hoher Interkorrelation differenziert erfasst werden kann, dienen heterogene Testbatterien bestehend aus mehreren Einzeltests geringer Interkorrelation der Erfassung komplexer, mehrdimensionaler Eigenschaften in Form mehrerer motorischer Fähigkeiten (Banzer et al., 2004). Abbildung 6.1.1 zeigt die Grundstruktur zur Auswahl sportmotorischer Testverfahren nach Bös (2009).

Aufgabenstruktur		Motorische Fähigkeiten								Passive Systeme der Energieübertragung
		Ausdauer		Kraft			Schnelligkeit		Koordination	
		AA	AnA	MK	KA	SK	AS	RS	KZ	KP
Lokomotionsbewegungen	gehen laufen									
	Sprünge									
Teilkörperbewegungen mit Ortsveränderung	Obere Extremitäten									
	Rumpf									
	Untere Extremitäten									
Teilkörperbewegungen ohne Ortsveränderung	Haltungen									
	isometrische Maximalkraft									

Abbildung 6.1.1: Grundstruktur zur Auswahl sportmotorischer Testverfahren nach Bös (Oberger, 2014, S. 16).

Darüber hinaus werden in der Praxis je nach Untersuchungskontext unterschiedliche Testbatterien eingesetzt, deren Validität und Reliabilität ausreichend untersucht sind. Eine umfassende Übersicht solcher Testbatterien lässt sich in Oberger (2014) finden. Neben der apparativen Testmethode der Spiroergometrie existieren somit beispielsweise auch nichtapparative sportmotorische Tests wie der Cooper-Test, der Conconi-

Test oder der Multiple-Shuttle-Run-Test zur Bestimmung der aeroben Leistungsfähigkeit. Im Gegensatz zur Spiroergometrie wird die maximale Sauerstoffaufnahme innerhalb dieser Tests jedoch nicht direkt gemessen, sondern aus physikalischen Leistungsgrößen geschätzt.

Nachfolgend soll eine kurze Definition der im Kontext dieser Arbeit wesentlichen leistungsphysiologischen Parameter gegeben und zum weiteren Verständnis deren Verhalten bei körperlicher Belastung sowie deren Adaption durch Training skizziert werden. Eine konkrete Beschreibung des Verhaltens ausgewählter leistungsphysiologischer Parameter bei kontinuierlicher Belastungssteigerung erfolgt in Kapitel 6.2.

6.1.1 Leistungsphysiologische Parameter

Die Herzfrequenz (HR) beschreibt die Anzahl der Herzschläge pro Minute (bpm). Durch ihre hohe Sensibilität für eine veränderte Belastung stellt sie einen wichtigen Beanspruchungsparameter dar. In Ruhe liegt die Herzfrequenz bei 60 bis 90 bpm. Bei zunehmender Belastung steigt die Herzfrequenz nach kurzer Anpassungsphase linear zur Belastung an und kann sich dabei verdreifachen. Ab einer Belastungsintensität von ca. 80 % der Maximalbelastung kann teilweise eine Reduktion der Anstiegs geschwindigkeit beobachtet werden (Löllgen & Steinberg, 2010). Bei stufenförmiger Belastungssteigerung nimmt die Herzfrequenz wie alle kardiopulmonalen Funktionsgrößen zunächst exponentiell zu und erreicht anschließend einen annähernd gleichbleibenden Wert. Während die Steilheit des Frequenzanstieges bei Belastung abhängig von Alter, Geschlecht, Körperkonstitution und Trainingszustand ist, ist die maximale Herzfrequenz unabhängig von Geschlecht, Körperkonstitution und Trainingszustand, nimmt aber mit dem Alter kontinuierlich ab (Löllgen & Steinberg, 2010). Die altersspezifisch maximale Herzfrequenz lässt sich durch verschiedene Formeln abschätzen. Während die individuelle maximale Herzfrequenz weitgehend unabhängig von der aktuellen Leistungsfähigkeit ist, ist die Geschwindigkeit, mit welcher die Herzfrequenz bei zunehmender Belastung steigt und nach Belastungsabbruch wieder sinkt ein Indikator für die kardiale Leistungsfähigkeit (de Marées, 2003).

Die Atemfrequenz (BF) ist ein Maß für die Anzahl der Atemzüge pro Minute (brpm). Diese ist abhängig von Alter, Geschlecht, Körperkonstitution und Trainingszustand und nimmt ausgehend von einer Ruhefrequenz von 12 bis 18 brpm mit steigender Belastung auf bis zu mehr als 120 brpm zu. Ursächlich hierfür ist ein bei körperlicher Beanspruchung erhöhter Kohlenstoffdioxid-Partialdruck im Blut, welcher im Atemzentrum registriert wird und zu einer gesteigerten Atemfrequenz führt (Schmidt et al., 2000).

Das Atemzugvolumen (\dot{V}_T) gibt als Anteil des zur rhythmischen Belüftung des Alveolarraumes maximal mobilisierbaren Lungenvolumens an, wie viel Volumen Atemgas pro Atemzug ein- und wieder ausgeatmet wird, und wird in Liter pro Minute gemessen (Maerz, 2011). Abhängig von Alter, Geschlecht, Körperkonstitution und Trainingszustand beträgt das Atemzugvolumen in etwa 500 ml min^{-1} und steigt bei Belastung auf bis zu $3,5 \text{ l min}^{-1}$ und mehr an (Schmidt et al., 2000).

Das Atemminutenvolumen (\dot{V}_E) gibt an, wie viel Volumen Atemgas pro Minute ein- und wieder ausgeatmet wird, und wird in Liter pro Minute (l min^{-1}) angegeben. Dem Produkt aus Atemfrequenz und Atemzugvolumen entsprechend ist es abhängig von Alter, Geschlecht, Körperkonstitution und Trainingszustand. Bei steigender Belastung nimmt es im Zuge eines gesteigerten Sauerstoffbedarfs linear von einem Ruhewert von 8 bis 10 l min^{-1} auf bis zu mehr als 200 l min^{-1} zu. Bei ca. 60% der maximalen Leistungsfähigkeit ist eine Erhöhung der Anstiegsgeschwindigkeit als Folge größerer Laktatmengen zu beobachten, bei deren Pufferung durch die Atmung abzutransportierendes CO_2 entsteht (Löllgen et al., 2010).

Bei steigender Belastung erfolgt eine Steigerung des Atemminutenvolumens zunächst über eine Erhöhung des Atemzugvolumens auf etwa 60% der Vitalkapazität in Ruhe. Erst dann ist eine weitere Zunahme durch eine erhöhte Atemfrequenz zu beobachten (Schwarz & Gitt, 2010). Ein im Zuge einer erhöhten Beteiligung des anaerob laktaziden Energiestoffwechsel an der Energiebereitstellung als Folge der respiratorischen Azidosekompensation überproportional zur Sauerstoffaufnahme ansteigendes Atemminutenvolumen gilt als Indikator für den respiratorischen Kompensationspunkt (Löllgen et al., 2010).

Die Sauerstoffaufnahme (\dot{V}_{O_2}) beschreibt die Menge Sauerstoff, die aus der eingeatmeten Atemluft pro Zeiteinheit vom Organismus aufgenommen wird und entspricht dem Produkt aus Herzfrequenz, Herzschlagvolumen und arteriovenöser Sauerstoffdifferenz. Die Angabe erfolgt üblicherweise in Liter pro Minute. Die Sauerstoffaufnahme ist ebenfalls abhängig von Alter, Geschlecht, Körperkonstitution und Trainingszustand. Unter Ruhebedingungen beträgt die Sauerstoffaufnahme ca. 0,3 bis $0,5 \text{ l min}^{-1}$. Bei steigender Belastung ist eine logistische Zunahme auf Werte von 3 bis $3,5 \text{ l min}^{-1}$ zu beobachten. Im Extrem können durch spezifisches Training Maximalwerte von mehr als 6 l min^{-1} erreicht werden. Unabhängig vom Trainingszustand ist ab dem 30. Lebensjahr jedoch eine Abnahme von durchschnittlich pro Jahr um 1% zu beobachten (de Marées, 2003). Zur Verbesserung der interindividuellen Vergleichbarkeit erfolgt eine Normalisierung durch das Körpergewicht. Man spricht dann von relativer Sauerstoffaufnahme, die üblicherweise in $\text{ml kg}^{-1} \text{ min}^{-1}$ angegeben wird. Bei maximaler Beanspruchung bleibt die Sauerstoffaufnahme trotz zunehmender Leistung konstant.

Die maximale Sauerstoffaufnahme des Organismus ist erreicht. Dieses als levelling off der Sauerstoffaufnahme bezeichnete Phänomen ist somit ein Indikator für die individuelle Ausbelastung.

Die im allgemeinen Sprachgebrauch als Kohlendioxidabgabe bezeichnete Kohlenstoffdioxidabgabe ($\dot{V}CO_2$) beschreibt die Menge an Kohlenstoffdioxid, die pro Zeiteinheit per Abatmung über die Lunge aus dem Blut eliminiert wird (Löllgen et al., 2010). Die Einheit der Kohlendioxidabgabe ist i. d. R. $l \cdot min^{-1}$. In Ruhe beträgt die Kohlendioxidabgabe etwa 0,2 bis 0,3 $l \cdot min^{-1}$. Unter Belastung nimmt die Kohlendioxidabgabe bis zur anaeroben Schwelle zunächst linear und proportional zur Sauerstoffaufnahme und anschließend überproportional zu (s. Kapitel 6.2) und kann im Extrem Werte über 7 $l \cdot min^{-1}$ erreichen (Löllgen et al., 2010).

Das Atemäquivalent für Sauerstoff ($\dot{V}E/\dot{V}O_2$) gibt an, wie viel Liter Atemgas für den Verbrauch von einem Liter Sauerstoff eingeatmet werden muss, und ist somit ein Maß für die Effektivität der Atmung. Unter Ruhebedingung liegt das $\dot{V}E/\dot{V}O_2$ bei ca. 28. Zu Beginn einer Belastung ist im Zuge einer erhöhten Atemökonomie zunächst ein Abfall des Atemäquivalents auf etwa 19 zu beobachten, bevor dieses bei zunehmender Belastung auf Werte von mehr als 30 ansteigt. Im Extrem werden bei ausbelasteten Spitzensportlern Werte von 45 und mehr erreicht. Als Indikator für eine Ausbelastung gilt ein $\dot{V}E/\dot{V}O_2 > 30$ (Löllgen et al., 2010).

Der respiratorische Quotient ergibt sich als Quotient aus Kohlendioxidabgabe und Sauerstoffaufnahme

$$RER = \frac{\dot{V}CO_2[l \cdot min^{-1}]}{\dot{V}O_2[l \cdot min^{-1}]}$$

und erfährt somit per Definition Änderungen in Abhängigkeit der jeweils aktuellen Belastungsintensität und damit einhergehenden metabolischen Beanspruchung. Da sich bei zunehmender körperlicher Belastung parallel zu einer erhöhten Sauerstoffaufnahme auch die Kohlendioxidabgabe je nach verstoffwechselten Substrat in substratspezifischem Verhältnis zur Sauerstoffaufnahme erhöht, wird der RER in der sportmedizinischen Praxis häufig dazu verwendet, um Aussagen über die momentane metabolische Situation zu treffen. Dieser nimmt bei reiner Verstoffwechselung von Fettsäuren durchschnittlich einen Wert von 0,71 an, wohingegen bei reinem Kohlenhydratumsatz im Allgemeinen ein RER von 1,0 vorliegt. Bei Kompensation einer metabolischen Azidose steigt der RER auf Werte > 1 an (Meyer, 2003).

Im Extrem können Ausdauerathleten Werte $> 1,15$ erreichen (Hollmann, 2006). Neben dem Ermöglichen von Rückschlüssen auf die aktuelle Stoffwechselsituation gibt der RER auch Auskunft über den Grad der Ausbelastung eines Individuums. Allge-

mein kann von einer Ausbelastung bei einem respiratorischen Quotienten von 1,1 ausgegangen werden. Ausdauertrainierte Sportler gelten jedoch bereits bei einem respiratorischen Quotient von $> 1,05$ als ausbelastet (de Marées, 2003).

Laktat ist ein Nebenprodukt der anaeroben glykolytischen ATP-Resynthese (s. Kapitel 6.2). Das im Zytosol in Folge der anaeroben Glykolyse anfallende Laktat gelangt nach diversen aktiven Transportmechanismen in den wasserlöslichen Verteilungsraum des Körpers und somit ins Blut, durch welches es über den venösen Rückstrom zum rechten Herzen transportiert wird. Auf dem Weg dahin kann es in andere Organkompartimente wie Niere, Leber, Herz, Gehirn und ruhende Muskelfasern umverteilt und dort verstoffwechselt werden, so dass im venösen Blut die Blutlaktatkonzentration in Abhängigkeit des durchströmten Gewebes schwankt. Aus diesem Grund erfolgt eine repräsentative Messung der Blutlaktatkonzentration durch Entnahme von Kapillarblut aus dem Ohrläppchen, welches als arterielles bzw. arterialisiertes Blut eine Durchschnittskonzentration des gesamten Körpers enthält (Röcker, 2013). Durch die ständige Beteiligung aller Energiestoffwechsel an der Energiebereitstellung sind auch in Ruhe Blutlaktatkonzentration von 0,5 bis 1,5 mmol l⁻¹ feststellbar. Im Kontext der Leistungsdiagnostik dient der Blutlaktatkonzentrationsanstieg in Relation zum Belastungsanstieg als ein Indikator zur Beurteilung der aeroben Leistungsfähigkeit. Dabei gilt ein möglichst geringer Anstieg der Blutlaktatkonzentration bei steigender Belastung im Kontext einer möglichst guten aeroben Leistungsfähigkeit als erstrebenswert. Als Referenzpunkte der Leistungsbeurteilungen dienen die aerobe und anaerobe Schwelle, welche je nach zu Grunde liegendem Konzept in spezifischer Form definiert sind. Die am häufigsten in der Praxis angewendeten Schwellen sind die fixe aerobe Schwelle nach Kindermann et al. (1979) bei einer Blutlaktatkonzentration von 2 mmol l⁻¹ und die anaerobe Schwelle nach Mader et al. (1976), die als fixe Blutlaktatkonzentration von 4 mmol l⁻¹ definiert ist. Diese beiden fixen Schwellen basieren auf dem durchschnittlichen Verhalten der Laktatkinetik bei stufenförmigem Belastungsanstieg. Neben diesen fixen Schwellen existieren verschiedene Modelle, die auf die Bestimmung individueller Schwellen abzielen. Eine gute Übersicht über die verschiedenen Schwellenkonzepte sowie eine Beurteilung ihrer jeweiligen Validität lässt sich in Dörr (2010) finden.

6.2 Energiestoffwechsel

Körperliche Arbeit erfolgt durch das komplexe Zusammenspiel verschiedener kontraktile Einheiten der Muskulatur des Bewegungsapparates. Die Kontraktion eines Muskels als Resultat zahlreicher asynchron ablaufender Verkürzungen einzelner Muskelfasern ist auf subzellulärer Ebene auf die Verkürzung der kontraktile Elemente der Myofibrillen zurückzuführen (Rehner & Daniel, 2010).

Abbildung 6.2.1 zeigt die Anordnung der Aktin- und Myosinfilamente einer Myofibrille in einer Skelettmuskelfaser.

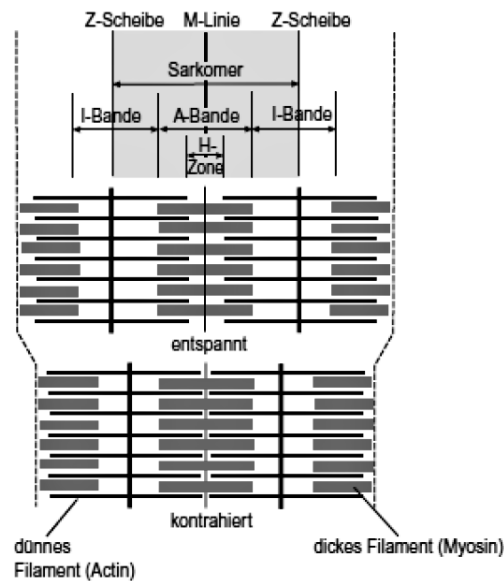


Abbildung 6.2.1: Anordnung der Myofilamente im entspannten und kontrahierten Zustand (Rehner & Daniel, 2010, S. 523).

Damit die Muskeln des menschlichen Körpers kontrahieren können und vor allem nicht nach einer einzigen Kontraktion bereits ermüden, braucht jede Muskelfaser wie alle Zellen des menschlichen Organismus auch Energie, deren physikalische Maßeinheit Joule (J) ist. Die für zelluläre Prozesse wie die Muskelkontraktionen benötigte Energie wird dabei ausschließlich aus der Spaltung des energiereichen Nucleotid-Coenzyms Adenosintriphosphats (ATP) in Adenosindiphosphat (ADP) und freies Phosphat (P_i) bereitgestellt (Knechtle, 2000). Andere Energieträger können auf Grund der enormen Spezifität der ATPase-Aktivität vom menschlichen Organismus und insbesondere der aus den Myosinfilamenten herausragenden Myosinköpfe nicht verwertet werden. Bei Aufspaltung der energiereichen Bindungen zweier Phosphatreste eines ATP in der Regel per Hydrolyse wird Energie zwischen 30 und 35 kJ mol^{-1} freigesetzt. Die freigesetzte Energie ermöglicht durch die Oszillation der Myosinköpfe die Bewegung von Aktin an Myosin in Richtung der Sarkomermite und so die Kontraktion der Muskulatur (Rehner & Daniel, 2010).

Die in der Muskulatur gespeicherten energiereichen phosphathaltigen Verbindungen ermöglichen durch eine maximale Energieflussrate sofortige körperliche Höchstleistung (Moosburger, 2009). Da der ATP-Vorrat im Muskel mit ca. 5 mmol ATP pro kg Muskelfeuchtmasse jedoch stark begrenzt ist und bereits ein Abfall des ATP um ca. 30 % zu einer Muskelkontraktionsinsuffizienz führt, muss kontinuierlich ATP aus ADP und P_i resynthetisiert werden (de Marées, 2003). Dabei kann die Resynthese prinzipiell unter Verwendung von Sauerstoff (aerob) oder sauerstofflos (anaerob) erfolgen.

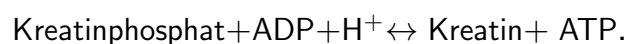
Die verschiedenen Arten der ATP-Resynthese unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Energieflussrate und Kapazität, welche sich antiproportional zueinander verhalten. Vor diesem Hintergrund werden

- der anaerob alaktazide Energiestoffwechsel,
- der anaerob laktazide Energiestoffwechsel und
- der aerobe Energiestoffwechsel

- hier absteigend nach ihrer Energieflussrate sortiert - unterschieden. Die anaeroben Stoffwechselwege sind aus chemischer Perspektive weniger komplex und können somit schneller ablaufen. Sie sind jedoch im Vergleich zum aeroben Stoffwechsel deutlich weniger effektiv. Die Energiemenge, die pro Zeiteinheit verbraucht wird, wird als Energieumsatz bezeichnet, welche wesentlich von der jeweiligen körperlichen Aktivität und deren Energiebedarf sowie dem Grundumsatz des Organismus abhängen. Als Grundumsatz wird die Energiemenge bezeichnet, die für den Strukturerhalt, die Thermoregulation sowie den Erhalt der Organfunktionen benötigt wird. Diese ist abhängig von der Körperkonstitution sowie äußeren Einflüssen wie der Temperatur und nimmt mit fortschreitendem Alter ab. Die darüber hinaus für die Muskelarbeit benötigte Energiemenge wird als Differenz von insgesamt benötigter Energiemenge und Grundumsatz als Leistungs-, Arbeits- oder Nettoenergieumsatz bezeichnet. Dabei kann jedoch lediglich ca. ein Drittel der freien Energie für mechanische Arbeit genutzt werden. Der größte Teil geht als Wärmeenergie verloren. Vor diesem Hintergrund wird der Wirkungsgrad einer Arbeitsform als Quotient aus geleisteter physikalischer Arbeit und verbrauchter Energie definiert (de Marées, 2003).

6.2.1 Anaerob alaktazider Energiestoffwechsel

Generell kann der Muskel bei körperlicher Arbeit auf das in den Muskelzellen gespeicherte ATP zurückgreifen und somit anaerob alaktazid, also ohne die Zuhilfenahme von Sauerstoff und ohne Bildung von Laktat, Energie freisetzen. Die ATP-Resynthese in der Muskelzelle kann zunächst ebenfalls anaerob alaktazid durch die Aufspaltung von ebenfalls in der Muskelzelle gespeichertem Kreatinphosphat (PCr oder KP) erfolgen:



Katalysiert durch die enzymatische Aktivität der Kreatinkinase, welche den Phosphatrest von Kreatinphosphat auf ADP überträgt, entstehen bei dieser sogenannten Lohmann-Reaktion ATP als universeller Energieträger und ein Kreatinrest.

Der menschliche Körper besitzt normalerweise 15 bis 20 mmol Kreatinphosphat pro kg Muskelfeuchtmasse, wodurch sich zusammen mit den ca. 5 mmol ATP pro kg Muskelfeuchtmasse insgesamt eine anaerob alaktazide Kapazität von 20 bis 25 mmol

pro kg Muskelfeuchtmasse ergibt, von welcher jedoch nur ca. 88 % nutzbar sind. Dies entspricht einer Leistungsfähigkeit von 3 bis 6 mmol ATP pro kg s^{-1} . Die anaerob alaktazide Kapazität reicht somit belastungsabhängig lediglich für eine Muskelarbeit von ca. 6 bis 8 s aus. Kurze (hoch intensive) Belastungen wie Stöße, Würfe oder Sprünge, Richtungswechsel und Antritte sind beispielsweise mit dieser Energiemenge möglich. Bei längerer Belastung dient diese Energiemenge lediglich zum Start der Muskelarbeit. Nach Ende einer Belastung wird das angesammelte Kreatin mit ATP wieder äußerst schnell zu Kreatinphosphat resynthetisiert. Dabei sind nach ca. 30 s bereits mehr als zwei Drittel des Kreatinphosphats regeneriert. Nach ca. 3 bis 5 min ist dieses vollständig resynthetisiert. In Abbildung 6.2.2 ist der zeitliche Verlauf der alaktaziden Kapazität nach kurzzeitiger Sprintbelastung skizziert.

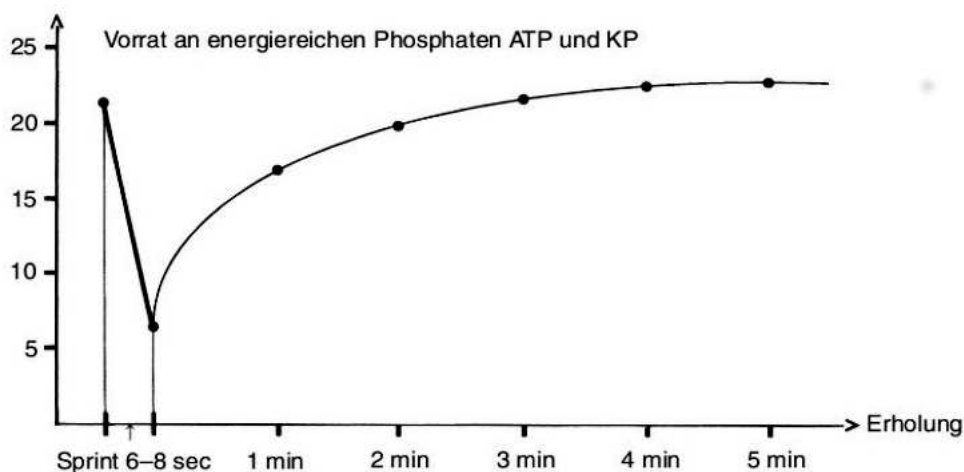


Abbildung 6.2.2: Zeitlicher Verlauf der alaktaziden Kapazität nach 6 – 8-sekündiger Sprintleistung (Janssen, 2003).

Bei aktiver Erholung bei einer Intensität von bis zu 40 % der $\dot{V}O_{2\max}$ ist eine um bis zu 20 % verminderte PCr-Resynthese zu beobachten (Spencer et al., 2006). Durch spezifische Trainingsinterventionen (z.B. intervallförmige kurze, hoch intensive Belastung gefolgt von passiver vollständiger Erholung) kann die Menge des im Muskel gespeicherten Kreatinphosphats auf bis zu 35 mmol pro kg Muskelfeuchtmasse erhöht und somit auch die Leistungsfähigkeit des anaerob alaktaziden Energiestoffwechsels auf bis zu mehr als 9 mmol ATP pro kg s^{-1} gesteigert werden (Heck & Schulz, 2002; de Marées, 2003).

Darüber hinaus kann ATP im geringen Maß auch innerhalb der Adenylatkinase-Reaktion unter der Bildung von Adenosinmonophosphat (AMP) aus zwei ADP resynthetisiert werden. Dieser Weg der ATP-Resynthese ist quantitativ von stark untergeordneter Bedeutung, wirkt jedoch aktivierend auf die Glykolyse (Heck, 2006).

6.2.2 Aerober Energiestoffwechsel

Eine weitere Form der ATP-Resynthese stellt die aerobe Energiebereitstellung dar. Bei dieser werden die über die Nahrung aufgenommenen und im Körper gespeicherten Kohlenhydrate, Fette und Eiweiße zunächst in die energiereichen Substrate Glukose, Fettsäuren und Aminosäuren aufgespalten und anschließend durch Enzyme katalysiert in den Muskelzellen durch die Reaktion mit Sauerstoff verstoffwechselt, wodurch schrittweise die Energie aus den energiereichen Substraten freigesetzt wird. Dabei müssen die Glukosemoleküle, Fett- und einige Aminosäuren³ zunächst in mehreren aufeinanderfolgenden Schritten biochemisch in die aktivierte Form der Essigsäure, das sogenannte Acetyl-Koenzym A (Acetyl-CoA), überführt werden (Knechtle, 2000). Der Abbau der Glukose zu Brenztraubensäure (Pyruvat) erfolgt dabei katalysiert durch zehn nacheinander geschaltete Enzyme und ohne Sauerstoff zunächst innerhalb der Glykolyse im Sarkoplasma der Muskelzelle. Abbildung 6.2.3 zeigt schematisch die Glykolyse der Muskelzelle.

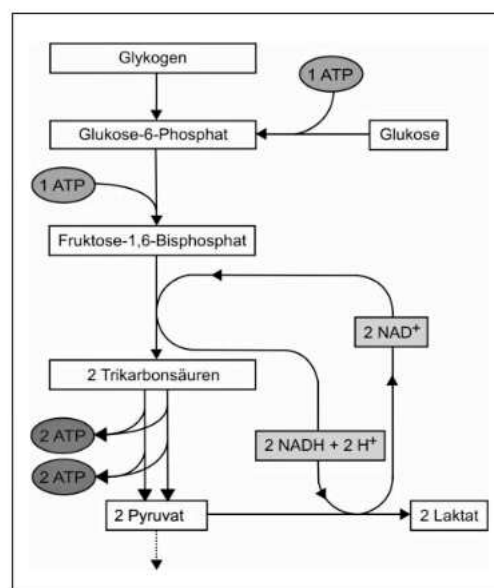
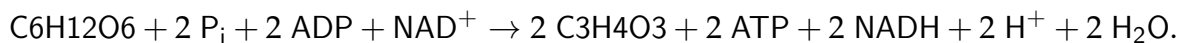


Abbildung 6.2.3: Schema der ATP-Resynthese per Glykolyse in der Muskelzelle (Heck, 2006, S. 24).

Im ersten Teil der Glykolyse wird zunächst Glukose unter Verbrauch von ATP durch die Hexokinase bzw. in der Leber durch die Glucokinase zu Glukose-6-phosphat phosphoryliert und anschließend durch die Phospho-gluko-isomerase zu Fructose-6-phosphat umgewandelt. Die Phosphofructokinase bildet ebenfalls unter ATP-Verbrauch aus Fructose-6-phosphat Fructose-1,6-bisphosphat. Dies ist ein irreversibler und geschwindigkeitsbestimmender Schritt. Im Anschluss spaltet Aldolase A die Hexose in die zwei Triosen Dihydroxyacetonphosphat und Glycerinaldehyd-3-phosphat. Da im Weiteren nur Glycerinaldehyd-3-phosphat verstoffwechselt werden

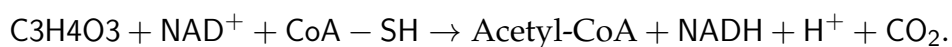
³Andere Aminosäuren dienen der Pyruvatgewinnung oder anaplerotischen Reaktionen.

kann, wird Dihydroxyacetonphosphat durch die Triosephosphatisomerase ebenfalls in Glycerinaldehyd-3-phosphat überführt. Im zweiten Teil der Glykolyse wird zunächst Glycerinaldehyd-3-phosphat durch Glycerinaldehyd-3-phosphat-Dehydrogenase unter Entstehung von $\text{NADH} + \text{H}^+$ und dem Verbrauch von P_i zu 1,3-Bisphosphoglycerat gebildet. Die Energie einer Phosphatbindung wird dabei zur Substratkettenphosphorylierung verwendet und es entstehen 3-Phosphoglycerat und ATP mit Hilfe der 3-Phosphoglyceratkinase. Durch eine Isomerase wird anschließend 3-Phosphoglycerat zu 2-Phosphoglycerat. Enolase katalysiert die Hydrolyse des 2-Phosphoglycerat zu Phosphoenolpyruvat. Phosphoenolpyruvat überträgt seine Phosphatgruppe auf ADP. Katalysiert durch die Pyruvatkinase entstehen Pyruvat und ATP. Betrachtet man die Nettobilanz der Glykolyse, so entstehen hier nach Subtraktion der zum Start der Glykolyse benötigten Energie aus 1 mol Glukose 2 mol Pyruvat, 2 mol $\text{NADH} + \text{H}^+$ und 2 mol ATP (Munk, 2008):



In der Muskulatur und in der Leber kann Glukose in Form von Glykogen als kettenförmiger bzw. baumartiger Zusammenschluss gespeichert werden. Ausgehend hiervon wird innerhalb der Glykogenolyse unter Phosphorylierung jeweils das endständige Glukosemolekül als Glukose-1-Phosphat abgespalten (de Marées, 2003). Dieses Molekül muss im Gegensatz zu aus Nahrung gewonnener Glukose nicht phosphoryliert, sondern isomerisiert werden, um in die Glykolyse einzutreten.

Im Anschluss an die Glykolyse wird bei ausreichendem Vorhandensein von Sauerstoff das Pyruvat durch den aus mehreren Enzymen bestehende Pyruvat-Dehydrogenase-Komplex zunächst decarboxyliert und anschließend unter Freisetzung von $\text{NADH} + \text{H}^+$ und CO_2 zu Acetyl-CoA umgewandelt (Munk, 2008):



Fettsäuren werden durch die β -Oxidation in Bruchstücke von 2 C-Atomen abgebaut und dann ebenfalls zu Acetyl-Koenzym A aktiviert und in den Citratzyklus eingebracht (Knechtle, 2000).

Im Citratzyklus wird nun unter der Gewinnung von Reduktionsäquivalenten Acetyl-CoA zu CO_2 und H_2O verstoffwechselt (Löffler & Petrides, 2014). Abbildung 6.2.4 zeigt schematisch die chemischen Reaktionen im Citratzyklus der Muskelzelle.

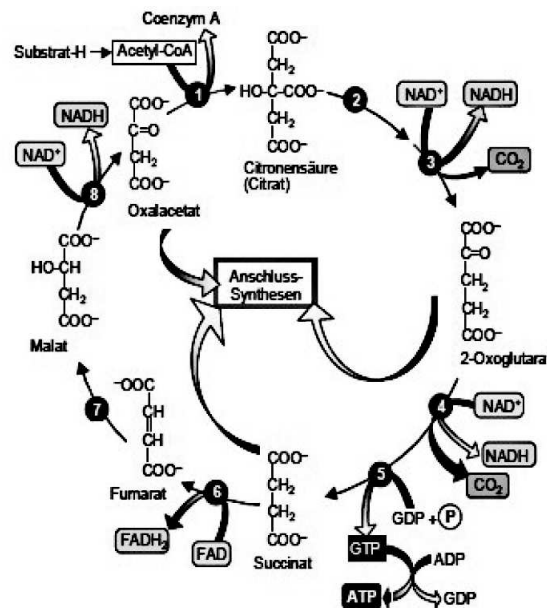


Abbildung 6.2.4: Schema des Citratzyklus in der Muskelzelle (Bannwarth et al., 2011, S. 409).

Zunächst wird Acetyl-CoA mit Oxalacetat durch die Citrat-Synthase zu Citrat, wodurch aus einem 2 C- und einem 4 C-Molekül ein 6 C-Molekül entsteht. Im Anschluss katalysiert die Aconitase die Bildung von Isocitrat aus Citrat. Unter der Entstehung von $\text{NADH} + \text{H}^+$ und CO_2 wird Isocitrat durch die Isocitrat-Dehydrogenase zu α -Ketoglutarat verstoffwechselt. Die α -Ketoglutarat-Dehydrogenase bildet unter Abspaltung von CO_2 und der $\text{NADH} + \text{H}^+$ -Bildung Succinyl-CoA aus α -Ketoglutarat. Katalysiert durch die Succinyl-CoA-Synthetase wird Succinyl-CoA nachfolgend zu Succinat. Die dabei frei werdende Energie wird zur Substratkettenphosphorylierung genutzt und aus GDP (Guanosindiphosphat) und P_i entsteht GTP (Guanosintriphosphat). Im Anschluss wird Succinat durch die Succinat-Dehydrogenase zu Fumarat, wobei FADH_2 gewonnen wird. Durch die Fumarase wird aus Fumarat L-Malat. Malat wird unter der Bildung von $\text{NADH} + \text{H}^+$ unter Zuhilfenahme der Malat-Dehydrogenase zu Oxalacetat. Dieses kann wieder mit einem Acetyl-CoA zu Citrat reagieren. Betrachtet man die Abschlussbilanz des Citratzyklus, so werden aus 1 mol Acetyl-CoA 1 mol GTP, 1 mol FADH_2 und 3 mol $\text{NADH} + \text{H}^+$ gebildet (Löffler & Petrides, 2014).

In der Atmungskette werden nun die im Citratzyklus durch den Abbau von Acetyl-CoA entstandenen Reduktionsäquivalente FADH_2 und $\text{NADH} + \text{H}^+$ dazu benutzt, einen H^+ -Gradienten in dem Intermembranraum des Mitochondriums aufzubauen. Dies geschieht über verschiedene Komplexe in der inneren Membran des Mitochondriums:

- Komplex I: Die $\text{NADH} + \text{H}^+$ -Dehydrogenase setzt $\text{NADH} + \text{H}^+$ zu $\text{NAD}^+ + \text{H}^+$ um. Dabei werden Elektronen auf Ubichinon übertragen und 3 – 4 H^+ in den Intermembranraum gepumpt.

- Komplex II: Mit Hilfe der Succinat-Dehydrogenase des Citratzyklus werden bei der Bildung des Fumarat Elektronen auf ein Ubichinon übertragen, wobei FADH_2 frei wird. Dabei werden jedoch keine H^+ in den Intermembranraum gepumpt.
- Komplex III: In der Cytochrom-c-Reduktase wird Ubichinol über Ubisemichinon wieder zu Ubichinon. Die Elektronen werden einzeln auf Cytochrom-c übertragen. Bei jeder Elektronenübertragung werden 2H^+ in den Intermembranraum gepumpt.
- Komplex IV: Cytochrom-c-Oxidase oxidiert Cytochrom-c und reduziert nach der Übertragung von 4 Elektronen Sauerstoff zu H_2O . Die exotherme Reduktion wird genutzt um 4H^+ in den Intermembranraum zu pumpen.
- Komplex V: F_0F_1 -ATPase nutzt den gebildeten H^+ -Gradienten um ATP aus ADP und P_i zu gewinnen. Dabei durchfließen H^+ das Enzym, welches dadurch rotiert. Durch 3 bzw 2,5 Drehungen entsteht ein ATP.

Abbildung 6.2.5 zeigt schematisch die chemischen Reaktionen der Atmungskette der Muskelzelle.

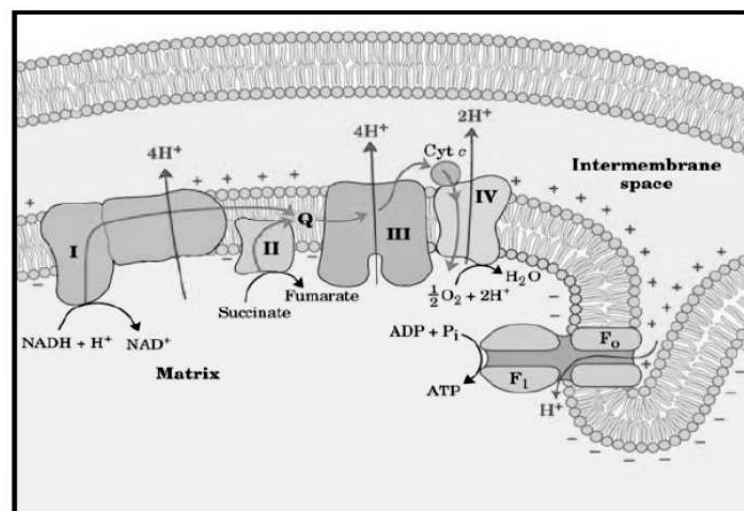


Abbildung 6.2.5: Schema der Atmungskette in der Muskelzelle (Gerber, 2013, S. 13).

Die ATP-Resynthese durch die Oxidation von Fettsäuren wird als aerob lipolytische Energiebereitstellung bezeichnet. Die Oxidation von Glukose wird aerob glykolytisch genannt. Aminosäuren tragen nur gering zur Energiebereitstellung bei.

Da aerob mit insgesamt 30 mol ATP aus 1 mol Glukose nicht nur die meiste Energie freigesetzt werden kann, sondern auch die beiden anderen ATP-Resynthesysteme durch die aerob gewonnene Energie regeneriert werden, ist dies der wichtigste Energiestoffwechsel im menschlichen Organismus. Wegen des aufwendigen biochemischen Ablaufes der Energiegewinnung über die Oxidation laufen die aeroben

Stoffwechselprozesse langsam ab und bilden pro Zeiteinheit mit maximal 0,24 bis 0,75 ml kg⁻¹ s⁻¹ Muskelfeuchtmasse weniger ATP als die anaeroben Prozesse. Dabei hängt die Energieflussrate neben dem verstoffwechselten Substrat entscheidend von der Sauerstoffaufnahmefähigkeit des Organismus ab. Bei Erschöpfung der Substrate beträgt die Halbwertszeit der Wiederauffüllung mehrere Tage (de Marées, 2003).

6.2.3 Anaerob laktazider Energiestoffwechsel

Ist es dem Muskel jedoch zum Beispiel auf Grund energetisch ungünstiger Bedingung nicht möglich, energiereiche Stoffe unter der Verwendung von Sauerstoff zu verstoffwechseln oder reicht die Menge der aerob bereitgestellten Energie pro Zeiteinheit nicht aus, um den Bedarf der Muskulatur zu decken, fällt am Ende der Glykolyse mehr Pyruvat an, als aerob verstoffwechselt werden kann. Mit diesem sammelt sich auch NADH + H⁺ an, welches jedoch in oxidierte Form des NAD⁺ als Wasserstoffakzeptor im zweiten Teil der Glykolyse benötigt wird. Um ohne Sauerstoff eine erneute Glykolyse zu ermöglichen, kann der Organismus das innerhalb dieser gebildete Pyruvat anstelle der Einschleusung in den Citratzyklus katalysiert durch die Laktatdehydrogenase in Laktat umwandeln. Die Wasserstoffprotonen erhält das Laktat vom mit dem Pyruvat anfallenden NADH + H⁺, welches folglich auf diese Weise zu NAD⁺ oxidiert wird und erneut als Wasserstoffakzeptor im zweiten Teil der Glykolyse dienen kann. Auf diese Weise kann die Glykolyse auch ohne das Vorhandensein von Sauerstoff erneut ablaufen. Diese Form der ATP-Resynthese wird nach diesem Vorgang benannt als anaerobe laktazide Energiebereitstellung bezeichnet. Mit 2 mol ATP pro 1 mol Glukose ist die anaerob laktazide Energiebereitstellung im Vergleich zu der aeroben Energiebereitstellung sehr unökonomisch. Jedoch ist die ATP-Resyntheserate mit 1,5 bis 3 mmol kg⁻¹ s⁻¹ Muskelfeuchtmasse ca. doppelt so hoch wie die des aeroben Energiestoffwechsels (Wahl et al., 2009). Der Nachteil der anaeroben laktaziden Energiegewinnung liegt in der Akkumulation von Milchsäure in seiner in Laktat und H⁺-Ionen dissoziierten Form als Nebenprodukt des glykolytischen Stoffwechselprozesses mit konsekutivem Abfall des pH-Wertes im Blut. Dabei ist die maximale Laktatbildungsrate abhängig vom muskulären Fasertyp. In glykolytischen Fasern (Typ IIa, Typ IIb, Typ IIx) ist die maximale Laktatbildungsrate mit 0,5 bis 0,9 μmol g⁻¹ deutlich höher als in oxidativen Muskelfasern (Typ I) mit 0,25 μmol g⁻¹. Da es bei einer zu starken Übersäuerung theoretisch zur Zerstörung intrazellulärer Eiweißstrukturen kommen würde, hat der niedrige pH-Wert eine Signalwirkung für die Stoffwechselhemmung, in deren Folge die Phosphofruktokinase der Glykolyse soweit gehemmt wird, dass diese zum Erliegen kommt. Die Muskelarbeit muss abgebrochen werden (Wahl et al., 2009).

Einer Azidose kann bis zu einem gewissen Grad durch zelluläre Puffersysteme wie Bicarbonat durch Bindung der H⁺-Ionen entgegengewirkt werden, wodurch vermehrt

CO₂ entsteht. Da der erhöhte CO₂-Gehalt im Blut eine Signalwirkung für die Atmung hat, in dessen Folge sich die (alveoläre) Ventilation und das Atemminutenvolumen erhöhen, wird dieses Puffersystem auch als respiratorische Kompensation bezeichnet. Darüber hinaus kann Laktat begünstigt dadurch, dass es mittels Transportproteinen zwischen unterschiedlichen Zellen, Geweben und Organen hin und her transportiert werden kann, in verschiedenen Zellen wie Myokard- und Leberzellen, aber auch in Muskelzellen selbst unter Aufwendung von ATP zu Pyruvat umgewandelt und anschließend dem aeroben Energiestoffwechsels zugeführt werden. So wechseln oxidative Muskelfasern bereits bei Laktatkonzentrationen von 1 bis 2 mmol l⁻¹ von einer Laktatabgabe zu einer Laktataufnahme zur aeroben Verstoffwechselung (Wahl et al., 2009). Die Laktateliminationsrate ist insgesamt jedoch auf ca. 0,5 mmol l⁻¹ min⁻¹ begrenzt (Knechtle, 2000).

Die Blutlaktatkonzentration steigt in der Regel nach intensiven Belastungen auf Grund einer die Laktateliminationsrate übersteigende Laktatinvasionsrate auch nach Belastungsende weiter an und erreicht ihr Maximum in der Regel innerhalb der ersten 15 Nachbelastungsminuten (de Marées, 2003). Um den Ausgangszustand des Körpers wiederherzustellen, muss das in der Belastungsphase angefallene Laktat abgebaut werden. Hierzu wird ca. 60 % des Laktats revolvieret in Pyruvat im Citratzyklus aerob zu H₂O und CO₂ verstoffwechselt. Das übrige Laktat wird entweder zu Organen wie Niere, Herz und Leber transportiert und dort abgebaut oder in der Leber in Glykogen umgewandelt und gespeichert. Die Erholung der laktaziden Energiebereitstellung erfolgt innerhalb der ersten Nachbelastungsstunde und benötigt zwischen 5 und 8 Liter O₂. Die mittlere Halbwertszeit der Laktatelimination ist dabei abhängig von der maximalen Laktatkonzentration. Die Abfallkinetik der Laktatkonzentration nach Belastungsende kann vereinfacht durch die Exponentialfunktion

$$\text{BLC}(t) = a \cdot e^{\frac{-t}{\tau_a}} + \text{BLC}_R \quad (6.2.1)$$

mit Amplitude der Laktatkonzentration a [mmol l⁻¹], Zeitkonstante der Laktatelimination τ_a [min] und Ruheblutlaktatkonzentration BLC_R [mmol l⁻¹] modelliert werden (Koch & Rachka, 1999; Beneke et al., 2007). Auf Grundlage dieses Modells ergibt sich für maximale Laktatkonzentrationen von ca. 5 mmol l⁻¹ eine Halbwertszeit von 10 Minuten, bei Laktatkonzentrationen von ca. 10 mmol l⁻¹ eine Halbwertszeit von 15 Minuten und bei sehr hohen Laktatkonzentrationen von bis zu 20 mmol l⁻¹ eine Halbwertszeit von > 25 Minuten. Bei aktiver Erholung, d.h. Erholung unter leichter Belastung, ist eine deutliche Verkürzung der Halbwertszeit zu beobachten. Hier ergibt sich eine Abbaurate von ca. 0,5 mmol l⁻¹ min⁻¹. Die maximale Eliminationsrate wird dabei bei ca. 40 – 50 % der maximalen Sauerstoffaufnahme erreicht (de Marées, 2003).

Abbildung 6.2.6 zeigt abschließend einen schematischen Überblick der Energiebereitstellung in der Muskelzelle.

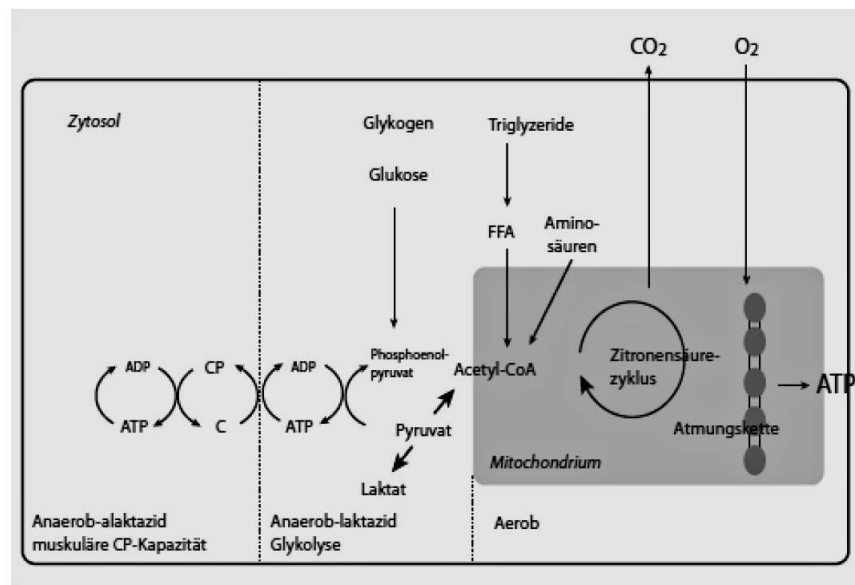


Abbildung 6.2.6: Schema der Energiebereitstellung in der Muskelzelle (Löllgen et al., 2010, S. 214).

6.2.4 Energiebereitstellung in Abhängigkeit von Belastungsintensität und Belastungsdauer

Auch wenn es von der schematischen Darstellung den Anschein macht, als wären die drei Formen der Energiebereitstellung isoliert, so sind diese jedoch zur Energiegewinnung bei körperlicher Arbeit immer gleichzeitig aktiv. Darüber hinaus erfolgt die ATP-Resynthese von Zellen ohne Mitochondrien wie den Erythrozyten ausschließlich anaerob per Glykolyse, so dass auch in Ruhe Blutlaktatkonzentrationen von bis zu mehr als 1 mmol l^{-1} zu beobachten sind. Allerdings ergibt sich bei körperlicher Arbeit in Abhängigkeit von Belastungsdauer und Belastungsintensität eine spezifische Dominanz der unterschiedlichen ATP-Resynthesewege, die aus dem Bestreben einer möglichst ökonomischen Energiebereitstellung resultieren (Boutellier & Ulmer, 2007). Abbildung 6.2.8 stellt die Energieflussrate pro Zeiteinheit unter Berücksichtigung der Kapazität der Energiestoffwechsel dar.

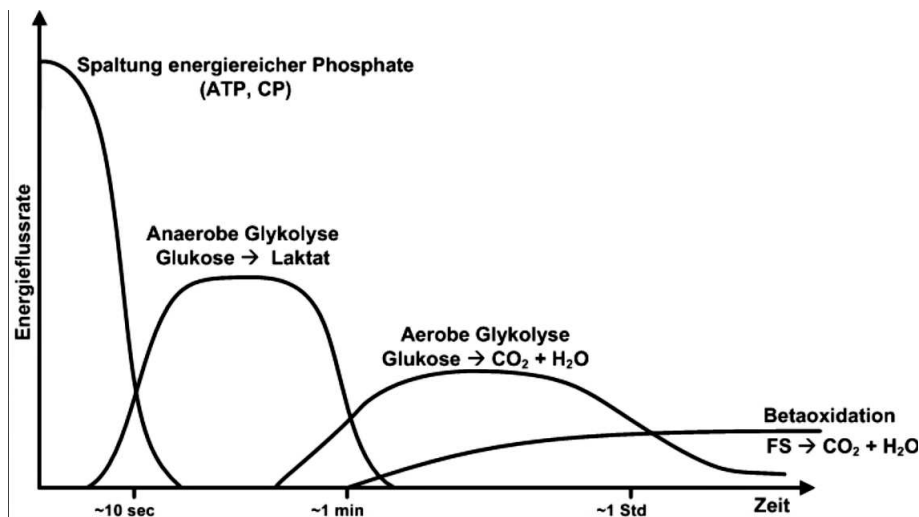


Abbildung 6.2.7: Kinetiken der muskulären Energiebereitstellung (Moosbacher, 2009, S. 15).

Bei Beginn einer körperlichen Arbeit kann der aus der abrupten muskulären Belastungssteigerung resultierende plötzlich erhöhte Energiebedarf der Muskelzelle auf Grund eines auf einer verzögerten Reaktion von Atmung und Kreislauf auf die aktuellen energetischen Anforderungen basierenden zu geringen Sauerstoffangebots nicht aerob gedeckt werden. Die zusätzlich benötigte Energie muss folglich zunächst dominant und bis zur Deckung des Sauerstoffbedarfs bedingt anaerob bereitgestellt werden. Der Körper geht dabei ein Sauerstoffdefizit ein, welches nach Ende der Belastung durch einen Teil der über Bedarf erhöhten Nachatmung kompensiert wird (s. Kapitel 6.3). Die zu Beginn einer Belastung anaerob bereitgestellte Energiemenge hängt dabei wesentlich von der Belastungsintensität sowie der $\dot{V}\text{O}_2$ -Kinetik ab, welche sich aus der Anpassungsgeschwindigkeit und Kapazität von Ventilation, Herzkreislaufsystem und der Sauerstoffverwertung in der Muskelzelle ergibt (Rossiter et al., 2010). Abbildung 6.2.8 zeigt die schematische Darstellung des Sauerstoffdefizits nach Weineck (2010).

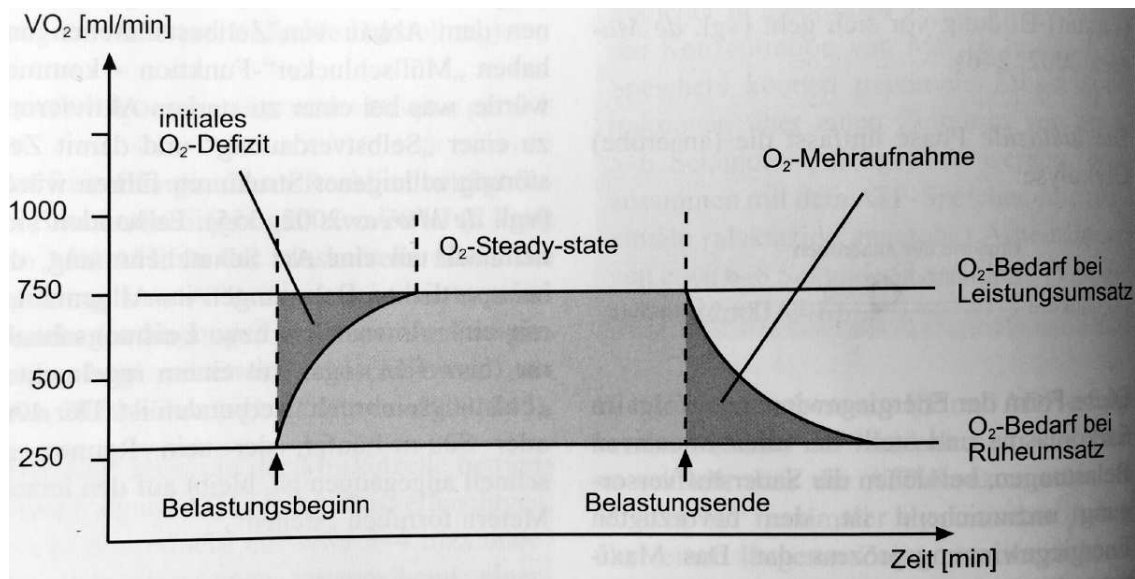


Abbildung 6.2.8: Schematische Darstellung des Sauerstoffdefizits (Weineck, 2010, S. 148).

Die Energie für die ersten Sekunden einer Belastung ($< 8\text{ s}$) wird dominant anaerob alaktazid bereitgestellt. Die ATP-Resynthese erfolgt dabei durch die Hydrolyse des im Muskel gespeicherten Kreatinphosphats. Nachfolgend wird bis zur Anpassung der Sauerstoffaufnahme an den aktuellen Energiebedarf ATP primär anaerob laktazid resynthetisiert. Bleibt im Anschluss die Belastungsintensität gering, wird die benötigte Energie überwiegend durch die aerobe Verstoffwechselung von Kohlenhydraten und Fetten in oxidativen Muskelfasern (Typ I) der Haupt- und Hilfsmuskulatur bereitgestellt, wobei sich das innerhalb der aeroben Energiebereitstellung dominant oxidierte Substrat in Abhängigkeit der Belastungsdauer ergibt. Während zu Beginn einer solchen Belastung die benötigte Energie ca. zu einem Drittel durch die aerobe Verstoffwechselung von Kohlenhydraten gewonnen wird, nimmt mit steigender Belastungsdauer bei gleichbleibender Intensität der Anteil der aerob lipolytischen ATP-Resynthese sukzessiv zu. Im Zuge der Gewährleistung der Bereitstellung einer der jeweils aktuell notwendigen ATP-Resyntheserate entsprechenden adäquaten Sauerstoffmenge durch die spezifische Leistung des Herzkreislaufsystems und der Atmung ist zunächst eine proportionale Steigerung von Ventilation, Atemminutenvolumen, Herzfrequenz sowie von Sauerstoffaufnahme und Kohlendioxidabgabe zu beobachten (Bachl & Kinzlbauer, 2010). Im Vergleich zur Ruhe ist dabei initial eine Ökonomisierung der Atmung festzustellen, so dass pro Liter eingeatmeter Luft mehr Sauerstoff aufgenommen wird. Somit sind solche Belastungen physiologisch zusätzlich durch einen leichten Abfall des O_2 Atemäquivalentes AEO_2 (s. Kapitel 6.1.1) und Blutlaktatwerten nahe dem Ruhewert ($1\text{ bis }1,5\text{ mmol l}^{-1}$) gekennzeichnet (Bachl & Kinzlbauer, 2010). Bei sukzessiver Belastungssteigerung reicht ab einem bestimmt Punkt die aerobe Resyntheserate von ATP nicht mehr aus, um den Energiebedarf der Muskulatur zum Erbringen der entsprechenden Leistung zu decken. In diesem

Fall werden zur Steigerung der ATP-Resyntheserate zusätzlich zu einer gesteigerten Frequenzierung der oxidativen Muskelfasern zunehmend glykolytische Muskelfasern (Typ IIa) rekrutiert und auf Grund der metabolischen Eigenschaften dieser vermehrt ATP anaerob laktazid resynthetisiert. Das in Folge vermehrt anfallende Laktat wird entweder in oxidativen Muskelzellen als Substrat des aeroben Energiestoffwechsels eliminiert oder durch Bicarbonat respiratorisch kompensiert (Bachl & Kinzlbauer, 2010). Dieser markante Stoffwechselpunkt wird als aerobe Schwelle bezeichnet und ist auf Grund der respiratorischen Laktatpufferung durch einen überproportionalen Anstieg von Kohlendioxidabgabe und Atemminutenvolumen bei gleichbleibend linearer Steigerung der Sauerstoffaufnahme sowie durch einen ersten signifikanten Anstieg der Blutlaktatkonzentration auf ca. 2 mmol l^{-1} charakterisiert. Während bei Untrainierten diese Schwelle bei ca. 45 – 50 % der $\text{VO}_{2\text{max}}$ liegt, kann diese durch spezifisches Ausdauertraining auf bis zu mehr als 60 % der maximalen Sauerstoffaufnahme verschoben werden. Im aerob-anaeroben Stoffwechselbereich befinden sich Laktatproduktion, Laktatelimination und die respiratorische Kompensation in einem isodynamischen Gleichgewicht, dessen obere Grenze als maximales Laktat-Steady-State bezeichnet wird. Steigt jedoch der Energiebedarf pro Zeiteinheit durch eine weitere Belastungssteigerung weiter an, so übersteigt in Folge einer gesteigerten Frequenzierung der Typ IIa-Fasern bei zusätzlich vermehrter Rekrutierung von Typ IIx-Fasern die Laktatbildung die Utilisations- und Kompensationsmechanismen. Das Gleichgewicht wird zerstört und es kommt basierend auf einer vermehrten Laktatakkumulation zu einer exponentiellen Zunahme der Blutlaktatkonzentration. Dieser diese Stoffwechselgrenze markierende Punkt wird als anaerobe Schwelle bezeichnet und lässt sich durchschnittlich in etwa bei einer Blutlaktatkonzentration von 4 mmol l^{-1} lokalisieren (Bachl & Kinzlbauer, 2010).

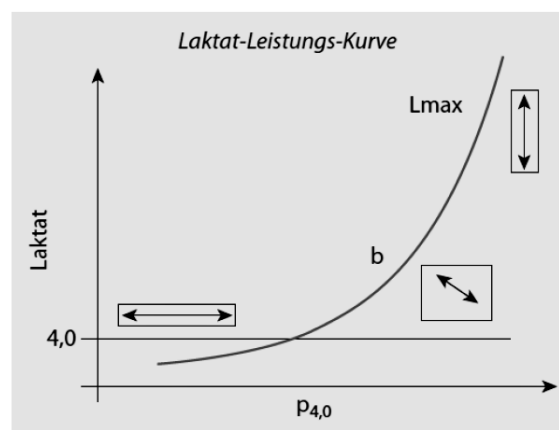


Abbildung 6.2.9: Laktatkinetik bei sukzessiver Belastungssteigerung (Löllgen et al., 2010, S. 17)

Untrainierte erreichen die anaerobe Schwelle ca. bei 50 bis 70 % ihrer maximalen Sauerstoffaufnahme. Durch Training kann die anaerobe Schwelle im Extrem jedoch

auf 85 bis 95 % der maximalen Sauerstoffaufnahme verschoben werden (Grosser et al., 2012). Wird die anaerobe Schwelle überschritten, so muss binnen kurzer Zeit auf Grund eines durch zunehmende Laktatakkumulation bedingten rapiden Abfalls des pH-Wertes die Belastung abgebrochen werden (de Marées, 2003).

Abbildung 6.2.10 zeigt das Verhalten ausgewählter respiratorischer und metabolischer Parameter bei sukzessiv ansteigender Belastung.

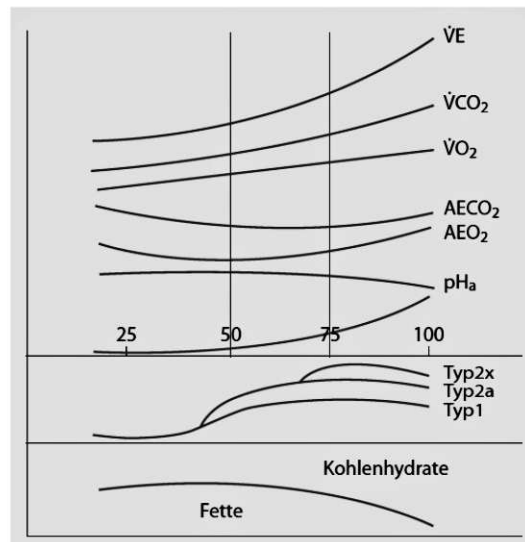


Abbildung 6.2.10: Verhalten respiratorischer und metabolischer Parameter bei sukzessiv ansteigender Belastung sowie Rekrutierung der Muskelfasern und dominant verstoffwechseltes Substrat (Löllgen et al., 2010, S. 15).

6.2.5 Energiebereitstellung bei intermittierender Belastung

Die leistungsphysiologische Besonderheit intermittierender Belastungen besteht in dem ständigen Wechsel von Belastungs- und Erholungsphasen. Betrachtet man die Energiebereitstellung bei solchen Belastungen, so wird hier die Dominanz der verschiedenen Energiestoffwechsel im Unterschied zu Dauerbelastungen neben der Belastungsdauer und -intensität innerhalb der Belastungsphasen auch durch die Dauer und Intensität der Erholungsphasen bzw. Belastungspausen bestimmt (Scott & Fountaine, 2013). Ist die Belastung in den Belastungsphasen gering bis moderat, so reicht die aerobe ATP-Resyntheserate aus, um die benötigte Energie bereitzustellen. Das zusätzliche Auftreten von Belastungspausen verstärkt hier die Dominanz des aeroben Energiestoffwechsels zusätzlich.

Bei hoch intensiven intermittierenden Belastungen variiert die dominante Form der ATP-Resynthese primär in Abhängigkeit von der Dauer der Belastungs- und Erholungsphasen sowie dem Belastungsumfang (Wonisch et al., 2017).

Wie bereits dargestellt wird in den ersten Sekunden einer hoch bis maximal intensiven Belastung die Energie primär anaerob alaktazid bereitgestellt. Damit bei zunehmender Belastungsdauer eine hohe Energieflussrate aufrecht erhalten werden kann, kommt es anschließend zu einer vermehrten Beteiligung des anaerob laktaziden Energiestoffwechsels, in deren Folge Laktat anfällt (Tabata et al., 1997). Dabei befinden sich Laktatproduktion und -elimination zunächst im Gleichgewicht. Mit zunehmender Belastungsdauer wird auf Grund des konstant hohen Energiebedarfs ab einem bestimmten Zeitpunkt dieses Gleichgewicht zerstört, die Laktatproduktion übersteigt die -elimination (s. Kapitel 6.2.4). Durch Anhäufung von Laktat bzw. H^+ -Ionen in der nachfolgenden Erholungsphase kommt es zu einer Limitierung der Phosphofruktokinase und dadurch zu einer Inhibition der Glykolyse (Sahlin et al., 1976; Mader & Heck, 1991). Die Energiebereitstellung muss zunehmend aerob erfolgen, wodurch es auf Grund einer verminderten Energieflussrate in der nachfolgenden Belastungsphase auch zu einem Absinken der Leistung kommt (Wonisch et al., 2017). Obwohl in den Belastungspausen keine weitere Laktatproduktion mehr stattfindet, ist die Laktatelimination auf Grund der hohen Halbwertszeit von Laktat gering, so dass die Energiebereitstellung auch in den nachfolgenden Belastungsphasen dominant aerob erfolgen muss. Auf Grund der bereits erwähnten respiratorischen Kompensation stellt der respiratorische Quotient einen Indikator für die Beteiligung des anaerob laktaziden Stoffwechsels an der Energiebereitstellung dar. Abbildung 6.2.11 zeigt das mit einer abnehmenden anaerob laktaziden Energiebereitstellung assoziierte Absinken des RER im Verlauf einer hoch intensiven 4 mal 4- min-Intervallbelastung.

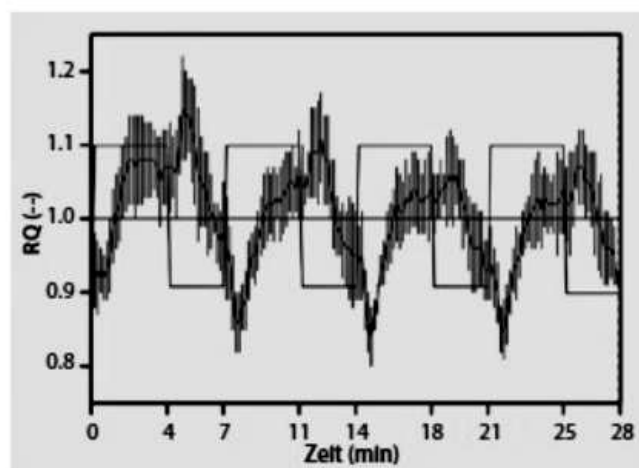


Abbildung 6.2.11: Verhalten des respiratorischen Quotienten (hier RQ) während einer hoch intensiven Intervallbelastung von 4 mal 4 min (Wonisch et al., 2017, S. 295).

Innerhalb der Belastungspause wird auch das in der Belastungsphase zur ATP-Synthese benötigte Kreatinphosphat in Abhängigkeit von Dauer und Art der Erho-

lungsphasen (aktiv, passiv) sowie der aeroben Leistungsfähigkeit durch den aeroben Stoffwechselweg zumindest partiell resynthetisiert. Hierzu wird der im Myoglobin gespeicherte Sauerstoff zur Bildung von Reduktionsäquivalenten verwendet und Myoglobin in einer weiteren Atemphase wieder mit Sauerstoff beladen (Gerber, 2013). Je länger und bewegungsärmer dabei die Erholungsphase und je besser die aerobe Leistungsfähigkeit, desto mehr Kreatinphosphat wird resynthetisiert (Spencer et al., 2006). Die für die Resynthese notwendige Zeit ergibt sich darüber hinaus primär in Abhängigkeit der vorangegangenen Entleerung und somit abhängig von der Intensität und Dauer der vorherigen Belastung (Wonisch et al., 2017). In kurzen Belastungsphasen wie z. B. 15 m-Sprints kommt es bei ausreichender Wiederherstellung der alaktaziden durch die aerobe Komponente in den Belastungspausen zu keinem merklich Leistungsabfall im Verlauf. Bei nicht ausreichender Resynthese erfolgt jedoch auch hier die Energiebereitstellung in der jeweils nachfolgenden Belastungsphase zunächst anaerob laktazid, bis erneut die Glykolyserate laktatkonzentrationsinduziert reduziert wird. Während die Laktatproduktionsrate sich primär in Abhängigkeit der Belastungsintensität bzw. des Energiebedarfs ergibt, hängt die Laktatakkumulation vorwiegend von der Belastungsdauer ab (Wonisch et al., 2017).

Abbildung 6.2.12 zeigt das Verhalten der Blutlaktatkonzentration in Abhängigkeit von Belastungs- und Erholungsdauer bei hoch intensiver intermittierender Belastung. Lange Belastungszeiten führen zu Blutlaktatkonzentrationen von mehr als 16 mmol l^{-1} , während bei kurzen Belastungsphasen selbst bei kurzer Pausendauer konstante Blutlaktatkonzentrationen um die 2 mmol l^{-1} beobachtet werden können.

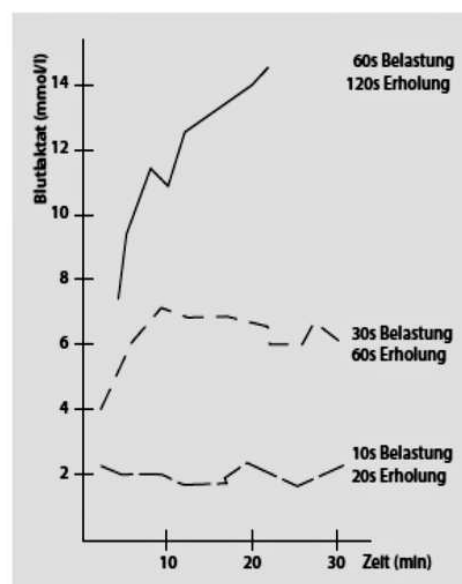


Abbildung 6.2.12: Verhalten der Blutlaktatkonzentration in Abhängigkeit von der Dauer der Belastungs- und Erholungsphasen bei hoch intensiven Intervallbelastungen (Wonisch et al., 2017, S. 294).

Balsom et al. (1992) konnten in diesem Kontext zeigen, dass bei zehn 15 m-Sprints gefolgt von 30 s-Pausen die Beteiligung des anaerob laktaziden Stoffwechsels an der Energiebereitstellung in den Belastungsphasen gering ist und der Kreatinphosphatspeicher in den Belastungspausen soweit wieder aufgefüllt wird, dass es im Verlauf der Sprints zu keinem merklich Leistungsabfall kommt.

Basierend auf Muskelbiopsien konnten Essén et al. (1977) nachweisen, dass bei einer Reduktion der Pausendauer auf 15 s bei wiederholender 15-sekündiger intensiver Belastung die PCr-Resynthese jedoch nur noch unvollständig abläuft, so dass zunächst die Beteiligung des anaerob laktaziden Energiestoffwechsels bis zur Hemmung der Glykolyse zunimmt. Anschließend erfolgt die Energiebereitstellung auch hier dominant aerob. Auch Trapp et al. (2007) berichten, dass bei Zunahme des Belastungsanteils an der Belastung-Pause-Relation zunächst der Anteil der anaerob laktaziden Energiebereitstellung zunimmt, der Körper bei Auslastung der anaeroben Energiebereitstellung jedoch auf die aerobe ATP-Resynthese umstellt, was mit einem Verlust der maximal erbringbaren Leistung einhergeht.

Das Verhältnis von Regenerationszeit, Dauer und Intensität bestimmen somit im entscheidenden Maß die Art der Energiebereitstellung während intermittierender körperlicher Belastung (Ferrauti, A., 2000). Untersuchungsdaten zur Belastungsstruktur und Beanspruchung können folglich Hinweise auf die Beteiligung der verschiedenen Energiestoffwechsel bei der Energiebereitstellung bei intermittierenden Belastungen geben. In der sportmedizinischen Forschung versucht man darüber hinaus basierend auf der Forschung von Knuttgen (1970) und dem Modell von di Prampero (1981) unter Einbezug von Sauerstoffaufnahme, Kohlendioxidabgabe und Blutlaktatkonzentration die exakte anteilige Energiebereitstellung bei unterschiedlicher sportlicher Belastung mathematisch zu approximieren.

6.3 Berechnung der anteiligen Energiebereitstellung bei körperlicher Belastung

Die Bestimmung des Energiebedarfs einer Arbeitsform kann generell per direkter oder indirekter Kalorimetrie erfolgen. Bei dem Verfahren der direkten Kalorimetrie wird der Energieumsatz direkt aus der mittels eines Kalorimeters gemessenen während der Belastung abgegeben Wärmemenge abgeleitet. Dieser kostenintensiven und apparativ aufwändigen Methode steht die sich in der Praxis als Standard etablierte Methode der indirekten Kalorimetrie gegenüber (Jeukendrup & Wallis, 2005). Hierbei handelt es sich um ein spiroergometrisches Verfahren, bei welchem die Bestimmung des Energiebedarfs eines Organismus anhand der im Belastungszeitraum aufgenommenen Sauerstoffmenge unter Ausnutzung der Existenz eines stöchiometrischen Verhältnisses von Sauerstoffaufnahme, Kohlendioxidabgabe, verstoffwechseltem

Substrat und Energieproduktion mit Hilfe der Formel

$$\text{Energiemenge} = \text{aufgenommene Sauerstoffmenge} \cdot \text{kalorisches Äquivalent}$$

erfolgt (Scharhag-Rosenberger & Schommer, 2013). Das kalorische Äquivalent bezeichnet dabei die Menge an Energie, die in Abhängigkeit der verstoffwechselten Substrate bei der Reaktion mit einem Liter Sauerstoff freigesetzt wird (Lang & Lang, 2007). Einen Indikator für die verstoffwechselten Substrate stellt der respiratorische Quotient (RER) dar, der sich aus dem Verhältnis von Kohlendioxidabgabe und Sauerstoffaufnahme ergibt (s. Kapitel 6.1.1). Dem jeweils verstoffwechselten Substratmischverhältnisses kann mit Hilfe des diesem entsprechenden Wertes des respiratorischen Quotienten ein spezifisches kalorische Äquivalent zugeordnet werden (Jeukendrup & Wallis, 2005). Unter Miteinbezug der Sauerstoffaufnahme nach Belastungsende und der belastungsbedingten Blutlaktatakkumulation können die von den einzelnen Energiestoffwechseln anteilig bereitgestellten Energiebeträge approximiert werden.

6.3.1 Berechnung der Energiebereitstellung des aeroben Energiestoffwechsels

Die im Belastungszeitraum der körperlichen Arbeit zuzuordnende aerob bereitgestellte Energiemenge (W_{AER}) wird durch die über dem Ruhenniveau ($\text{VO}_{2\text{R}}$) liegende Sauerstoffaufnahme während der Belastung, die sogenannte Nettosauerstoffaufnahme ($\text{VO}_{2\text{NET}}$), repräsentiert und kann unter Berücksichtigung des Körpergewichts per indirekter Kalorimetrie wie folgt berechnet werden (Beneke et al., 2004)⁴:

$$W_{\text{AER}} [\text{J kg}^{-1}] = \text{VO}_{2\text{NET}} [\text{ml kg}^{-1}] \cdot \text{kalorisches Äquivalent} [\text{J ml}^{-1}]. \quad (6.3.1)$$

Dabei kann die während der Belastung aufgenommene Sauerstoffmenge ($\text{VO}_2 \in \mathbb{R}^+$) durch das Integral der interpolierten Sauerstoffaufnahme ($\dot{\text{VO}}_2(t) : \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}^+$, $\dot{\text{VO}}_2(t)$ stetig) über die Belastungszeit approximiert werden. Dieses kann nach dem Mittelwertsatz der Integralrechnung als Produkt aus mittlerer Sauerstoffaufnahme ($\dot{\text{VO}}_2 \in \mathbb{R}^+$) im Belastungszeitraum $[s, T] \subseteq \mathbb{R}^+$ und Belastungsdauer $(T - s) \in \mathbb{R}^+$ bestimmt werden (Walter, 1990), wobei $s \geq 0$ den Startzeitpunkt der Belastung und T mit $s \leq T$ den Zeitpunkt des Belastungsabbruchs bezeichnen:

$$\text{VO}_2 [\text{ml}] = \int_s^T \dot{\text{VO}}_2(t) [\text{ml min}^{-1}] dt = \dot{\text{VO}}_2 [\text{ml min}^{-1}] \cdot (T - s) [\text{min}]. \quad (6.3.2)$$

Formel (6.3.2) ist in Abbildung 6.3.1 veranschaulicht.

⁴Zur Gewährleistung einer möglichst hohen Nachvollziehbarkeit der Berechnungsschritte werden in den Darstellungen die innerhalb dieser Arbeit verwendeten Einheiten mitgeführt.

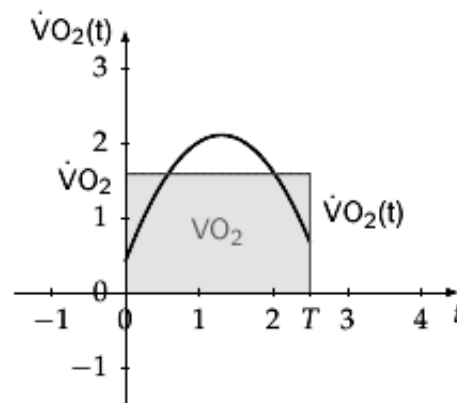


Abbildung 6.3.1: Graphische Veranschaulichung von Formel (6.3.2). $\dot{V}O_2(t)$ [l min^{-1}] beschreibt die aus den spiroergometrischen Messdaten interpolierte Sauerstoffaufnahme im Belastungszeitraum $[0, T]$. Die grau unterlegte Fläche entspricht dem Produkt aus durchschnittlicher Sauerstoffaufnahme ($\dot{V}O_2$ [l min^{-1}]) und Belastungsdauer (T [min]).

Die Messung der Ruhesauerstoffaufnahme sollte je nach Art der anschließenden körperlichen Belastung unter Ruhebedingungen im Liegen oder Stehen gemessen werden. Da sich eine Messung unter Ruhebedingung unmittelbar vor einer sportlichen Belastung häufig als schwierig erweist, kann die Abschätzung der unter Ruhebedingungen aufgenommenen Sauerstoffmenge alternativ mit Hilfe sich in der Praxis als ausreichend valide erwiesener Referenzwerte erfolgen. In Kenntnis der während der Beanspruchung aufgenommenen Sauerstoffmenge VO_2 [ml] ergibt sich die gewichtsbezogene Nettosauerstoffaufnahme durch die folgende Rechnung:

$$VO_{2\text{NET}} [\text{ml kg}^{-1}] = \frac{VO_2 [\text{ml}] - VO_{2R} [\text{ml}]}{\text{Körpergewicht} [\text{kg}]}.$$

6.3.2 Berechnung der Energiebereitstellung des anaerob alaktaziden Energiestoffwechsels

Die Bestimmung des Anteils der anaerob alaktaziden Energiebereitstellung bei körperlicher Belastung basiert theoretisch auf dem physiologischen Phänomen einer nach Belastungsende erhöhten Herz- und Atemfrequenz bedingt durch einen im Vergleich zum Sauerstoffbedarf unter vergleichbaren Bedingungen ohne die vorangegangene Belastung erhöhten Sauerstoffaufnahme. Diese in Bezug auf die aktuelle Belastung als überschüssig zu beurteilende Sauerstoffaufnahme wird auch als Excess Post Exercise Oxygen Consumption (EPOC) bezeichnet (Krogh & Lindhard, 1920). Ursächlich für die erhöhte Sauerstoffaufnahme auch nach Ende einer Belastung ist das Bestreben des Körpers, seinen homöostatischen Ausgangszustand wiederherzustellen, sprich zu regenerieren. Die Regeneration besteht dabei aus energetischer Sicht primär aus der Resynthese des während der Belastung an der ATP-Resynthese beteiligten PCr insbesondere durch die aerobe Verstoffwechselung

von Laktat (s. Kapitel 6.2). Aus diesem Grund muss die hierzu benötigte, von Dauer und Intensität der vorangegangenen Belastung abhängige Sauerstoffmenge energetisch der Belastungsphase zugeordnet werden (Baum, & Schuster, 2008).

Unter Ruhebedingungen verläuft die Abnahme der Sauerstoffaufnahme nach Belastungsende bis zum Ruheniveau annähernd exponentiell und lässt sich energetisch in eine schnelle und eine langsame Komponente unterteilen (Knuttgen, 1970). Die schnelle Komponente (fast component) beschreibt die Sauerstoffmenge pro Zeiteinheit ($\dot{V}O_{2\text{FAST}}$), die durch Rephosphorylierung von Kreatinphosphat die alaktazide Komponente der Energiebereitstellung regeneriert. Die Wiederherstellung der alaktaziden Leistungsfähigkeit verläuft exponentiell, erfolgt in der Regel innerhalb der ersten drei Minuten nach Belastungsabbruch und benötigt zwischen einem und drei Liter Sauerstoff (s. Kapitel 6.2.1). Die der langsamen Komponente (slow component) zuzuordnende Sauerstoffaufnahme ($\dot{V}O_{2\text{SLOW}}$) regeneriert primär durch sukzessiven Abbau von Laktat die laktazide Komponente (Bruscia, 2014). Generell ist die Dauer des Regenerationsprozesses multifaktoriell bedingt und somit beispielsweise abhängig vom Trainingszustand des Einzelnen, der Dauer und Intensität der Belastung und der Art der Erholung (de Marées, 2003). Abbildung 6.3.2 zeigt den modellierten Verlauf der Sauerstoffaufnahme in der Nachbelastung.

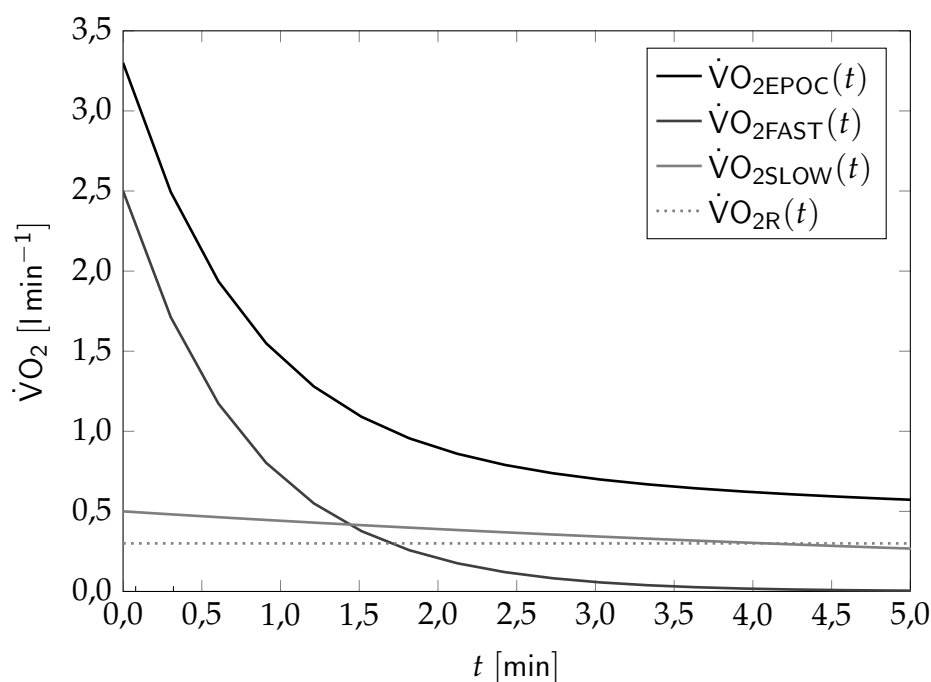


Abbildung 6.3.2: Graphische Darstellung der Abfallkinetik der Sauerstoffaufnahme in der Nachbelastung nach Knuttgen (1970). Die Funktionen $\dot{V}O_{2\text{EPOC}}(t)$, $\dot{V}O_{2\text{FAST}}(t)$ und $\dot{V}O_{2\text{SLOW}}(t)$ beschreiben die Gesamtsauerstoffaufnahme sowie die Sauerstoffaufnahme der schnellen und die der langsamen Komponente der Nachatmung zum Zeitpunkt t der Nachbelastung. $\dot{V}O_{2\text{R}}(t)$ entspricht der Sauerstoffaufnahme unter Ruhebedingungen ebenfalls zum Zeitpunkt t .

Die Abfallkinetik der Sauerstoffaufnahme nach Belastungsende lässt sich mathematisch durch die folgende Bi-Exponentialfunktion $f : \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}^+$ zur Basis $e = \lim_{n \rightarrow \infty} (1 + \frac{1}{n})^n \approx 2,71828$ modellieren (Knuttgen, 1970; Beneke et al., 2002):

$$\dot{V}O_{2EPOC}(t) = a \cdot e^{\frac{-t}{\tau_a}} + b \cdot e^{\frac{-t}{\tau_b}} + c, \quad (6.3.3)$$

wobei $a \geq 0$ und $b \geq 0$ die Amplituden der Sauerstoffaufnahme der schnellen bzw. langsamen Komponente in Milliliter pro Minute, $\tau_a \geq 0$ und $\tau_b \geq 0$ die Zeitkonstanten der Regeneration der anaerob alaktaziden bzw. laktaziden Energiebereitstellungswege in Dezimalminuten und $c := \dot{V}O_{2R}$ die Sauerstoffaufnahme in Milliliter pro Minute unter Ruhebedingungen beschreiben. $\dot{V}O_{2EPOC}(t)$ [ml min^{-1}] entspricht dann der Sauerstoffaufnahme zum Zeitpunkt t innerhalb des Nachbelastungszeitraumes $[0, T_{NB}] \subseteq \mathbb{R}^+$. Betrachtet man die Funktionsvorschrift vor dem Hintergrund ihrer Modellfunktion, so wird durch den ersten Term die schnelle Komponente und durch ihren zweiten Term die langsame Komponente der Nachatmung beschrieben.

Nach obigen Darstellungen kann somit davon ausgegangen werden, dass der anaerob alaktazide Energieanteil durch die Sauerstoffaufnahme der schnellen Komponente der EPOC repräsentiert und ebenfalls per indirekter Kalorimetrie bestimmt werden kann (Knuttgen, 1970; Beneke et al., 2002; de Marées, 2003). Unter Verwendung der Modellfunktion (6.3.3) kann die der Rephosphorylierung von Kreatinphosphat zuzuordnende Sauerstoffmenge VO_{2PCr} durch das Integral des die schnelle Komponente der Nachatmung beschreibenden Funktionsterms vom Zeitpunkt des Belastungsabbruchs $s = 0$ der Nachatmung bis zum Endzeitpunkt der spiroergometrischen Nachbelastungsmessung $T_{NB} \geq 0$ bestimmt werden:

$$VO_{2PCr} [\text{ml}] := \int_s^{T_{NB}} a \cdot e^{\frac{-t}{\tau_a}} dt.$$

Ist hierbei $T_{NB} \geq 4\tau_a > \tau_a$, kann mit $T := x \cdot \tau_a$, $x \geq 4$, wegen $-a \cdot \tau_a e^{-x} \approx 0$ und $\lim_{x \rightarrow \infty} -a \cdot \tau_a e^{-x} = 0$ folgende Abschätzung vorgenommen werden:

$$\begin{aligned} \int_s^T a \cdot e^{\frac{-t}{\tau_a}} dt &= [a \cdot (-\tau_a \cdot e^{\frac{-t}{\tau_a}})]_s^T \\ &= -a \cdot \tau_a \cdot e^{-x} + a \cdot \tau_a \\ &\approx a \cdot \tau_a. \end{aligned}$$

Physiologisch lässt sich die obige Abschätzung dadurch begründen, dass nach einer Regenerationszeit von $4\tau_a$ in der Regel über 99 % der alaktaziden Energiebereitstellungskomponente regeneriert sind. Die Sauerstoffaufnahme der schnellen Komponente der Nachatmung entspricht somit dem Wert des Integrals und kann für $T \geq 4\tau_a$ unter Zuhilfenahme der Formel

$$\text{VO}_{2\text{PCr}} [\text{ml}] = a [\text{ml min}^{-1}] \cdot \tau_a [\text{min}]$$

berechnet werden.

Unter Berücksichtigung des Körpergewichts kann die während der Belastung anaerob alaktazid bereitgestellte Energiemenge $W_{\text{PCr}} [\text{J kg}^{-1}]$ dementsprechend wie folgt approximiert werden:

$$W_{\text{PCr}} [\text{J kg}^{-1}] = \text{VO}_{2\text{PCr}} [\text{ml kg}^{-1}] \cdot \text{kalorisches Äquivalent} [\text{J ml}^{-1}]. \quad (6.3.4)$$

6.3.3 Berechnung der Energiebereitstellung des anaerob laktaziden Energiestoffwechsels

In Anlehnung an Beneke (2004) kann der anaerob laktazide Anteil der Energiebereitstellung während einer Belastung auf Grundlage der Nettolaktatproduktion (ΔBLC) bestimmt werden, welche sich als Differenz der der Belastungsphase zuzuordnenden maximalen Blutlaktatkonzentration ($\text{BLC}_{\text{max}} [\text{mmol l}^{-1}]$) und der Ruheblutlaktatkonzentration ($\text{BLC}_R [\text{mmol l}^{-1}]$) darstellt:

$$\Delta\text{BLC} [\text{mmol l}^{-1}] := \text{BLC}_{\text{max}} - \text{BLC}_R.$$

Unter Verwendung eines dem Laktat-Verteilungsraum der Körpermasse entsprechenden O_2 -Laktat-Äquivalents (di Prampero et al., 1981) kann der energetische Beitrag des anaerob laktaziden Energiestoffwechsels durch die folgende Gleichung bestimmt werden (Beneke et al., 2004; Zagatto et al., 2016):

$$W_{\text{BLC}} [\text{J kg}^{-1}] = \Delta\text{BLC} [\text{mmol l}^{-1}] \cdot \text{O}_2\text{-Laktatäquivalent} [\text{ml kg}^{-1} \text{mmol}^{-1}] \cdot \text{kalorisches Äquivalent} [\text{J ml}^{-1}].$$

Da hier eine Bewertung des Energiebeitrags des anaerob laktaziden Stoffwechsels erfolgt, wird zur Berechnung des anaerob laktaziden Energieanteils stets ein kalorisches Äquivalent von $21,131 [\text{J ml}^{-1}]$ verwendet (Hollmann & Hettinger, 2000). Für eine bessere Vergleichbarkeit der partiellen metabolischen Leistungen wird die folgende Definition getroffen:

$$\text{VO}_{2\text{BLC}} [\text{ml kg}^{-1}] := \Delta\text{BLC} [\text{mmol l}^{-1}] \cdot \text{O}_2\text{-Laktatäquivalent} [\text{ml kg}^{-1} \text{mmol}^{-1}].$$

Somit ergibt sich die anaerob laktazid bereitgestellte Energiemenge durch:

$$W_{\text{BLC}} [\text{J kg}^{-1}] = \text{VO}_{2\text{BLC}} [\text{ml kg}^{-1}] \cdot 21,131 [\text{J ml}^{-1}].$$

6.3.4 Berechnung der anteiligen Energiebereitstellung der aeroben und anaeroben Energiestoffwechsel

Zur Bestimmung der insgesamt benötigten Energiemenge (W_{TOT}) werden die einzelnen Energieanteile $W_{\text{AER}} [\text{J kg}^{-1}]$, $W_{\text{PCr}} [\text{J kg}^{-1}]$ und $W_{\text{BLC}} [\text{J kg}^{-1}]$ addiert:

$$W_{\text{TOT}} [\text{J kg}^{-1}] = W_{\text{AER}} + W_{\text{PCr}} + W_{\text{BLC}}.$$

Die anteilige Energiebereitstellung der einzelnen Energiestoffwechselwege ergibt sich dann in Prozent des energetischen Gesamtbedarfs als mit dem Faktor 100 multiplizierter Quotient aus der den einzelnen Energiestoffwechselwegen zugeordneten Energiemenge und der Gesamtenergiemenge:

$$\begin{aligned} \%W_{\text{AER}} [\%] &:= \frac{W_{\text{AER}}}{W_{\text{TOT}}} \cdot 100, \\ \%W_{\text{PCr}} [\%] &:= \frac{W_{\text{PCr}}}{W_{\text{TOT}}} \cdot 100, \\ \%W_{\text{BLC}} [\%] &:= \frac{W_{\text{BLC}}}{W_{\text{TOT}}} \cdot 100. \end{aligned}$$

Darüber hinaus lässt sich die (anteilige) metabolische Leistung aus den Energiebeiträgen der einzelnen Energiestoffwechsel bzw. dem energetischen Gesamtbedarf in Relation zur Belastungsdauer ($T - s$) berechnen (Latzl et al., 2017):

$$\begin{aligned} P_{\text{AER}} [\text{W kg}^{-1}] &:= \frac{W_{\text{AER}} [\text{J kg}^{-1}]}{(T - s) [\text{s}]}, \\ P_{\text{PCr}} [\text{W kg}^{-1}] &:= \frac{W_{\text{PCr}} [\text{J kg}^{-1}]}{(T - s) [\text{s}]}, \\ P_{\text{BLC}} [\text{W kg}^{-1}] &:= \frac{W_{\text{BLC}} [\text{J kg}^{-1}]}{(T - s) [\text{s}]}, \\ P_{\text{TOT}} [\text{W kg}^{-1}] &:= \frac{W_{\text{TOT}} [\text{J kg}^{-1}]}{(T - s) [\text{s}]}. \end{aligned}$$

Teil II

Methodik

7 Studiendesign

Um die in Teil I formulierten Fragestellungen und in Kapitel 5 diesbezüglich aus der bisherigen Datenlage abgeleiteten Forschungshypothesen zu untersuchen, wurde eine Studie konzipiert, die insgesamt aus fünf bzw. sechs Teiluntersuchungen bestand, denen drei experimentelle Untersuchungen zu Grunde lagen. Der Aufbau der Gesamtstudie ist in Abbildung 7.0.1 dargestellt.



Abbildung 7.0.1: Schematische Darstellung des Studiendesigns.

Die Gesamtstudie gliederte sich in eine Haupt-(II.-V.) und eine Nebenuntersuchung (I.), denen zwei verschiedene, sich jedoch teilweise überschneidende Probanden-pole zu Grunde liegen.

8 Probanden

Da es das Ziel der Studie war, die physiologischen Anforderungen und körperlichen Leistungsvoraussetzungen von Squash im Elitebereich zu beschreiben und auf Veränderungen in Abhängigkeit des Spielniveaus zu untersuchen, wurden Probanden gesucht, die entweder Teil der Bundeselite Squash waren oder maximal auf Landesebene agierten. Die Rekrutierung der Probanden erfolgte unter Mithilfe des DSQV nach den Auswahlkriterien Verfügbarkeit im Testzeitraum und möglichst vergleichbarer Spielstärken innerhalb der Spielniveaus zur Gewährleistung spielstärkenhomogener Spielpaarungen. Wichtig war darüber hinaus eine regelmäßige Trainingsroutine und die Teilnahme an offiziellen Wettbewerben seit mind. 3 Jahren. Alle Probanden wurden vom Trainergespann der deutschen Nationalmannschaft Squash nach ihrer Spielstärke sortiert und so ein Expertenranking erstellt, in welchem dem als spielstärksten bewerteten Spieler der Ranglistenplatz eins und dem Probanden mit der geringsten Spielstärke der letzte Ranglistenplatz zugeordnet wurde. Nachfolgend werden die Probandenpools der Haupt- und Nebenuntersuchung beschrieben.

8.1 Probanden der Hauptuntersuchung

An der Studie nahmen insgesamt 22 männliche Squashspieler im Alter von 17 bis 62 Jahren teil. Davon agierten 12 Spieler im Testzeitraum auf mindestens nationalem Niveau und bildeten die Probandengruppe Squash national. Alle Probanden Squash national waren zum Testzeitpunkt Teil der deutschen Nationalmannschaft. 11 Spieler spielten in der 1. Bundesliga, ein Spieler in der PSA (Nr. 42 der Welt). Zwei Spieler waren darüber hinaus ehemals in der PSA aktiv. Die Probandengruppe Squash regional setzte sich aus zehn auf Landesniveau agierenden Spielern zusammen. Sechs der Probanden spielten im Testzeitraum in der Hessenliga, vier in der Landesliga. Die anthropometrischen Daten der Probanden sind in Kapitel 14 dargestellt.

8.2 Probanden der Nebenuntersuchung

An der Nebenuntersuchung nahmen 13 Probanden des Spielniveaus Squash national und acht Probanden des Spielniveaus Squash regional teil. Sieben der Probanden Squash national und alle Probanden Squash regional partizipierten auch an der Hauptuntersuchung. Die Probanden Squash national waren zum jeweiligen Testzeitpunkt Teil der deutschen Nationalmannschaft Squash. Drei der 13 Spieler spielten in der PSA (Nr. 8, Nr. 42 und Nr. 84 der Welt), die übrigen in der 1. Bundesliga. Die anthropometrischen Daten der Probanden sind ebenfalls in Kapitel 14 dargestellt.

9 Durchführung

Die Hauptuntersuchung bestand aus einer Laufbandspiroergometrie mit Laktatdiagnostik zur Bestimmung der kardialen, respiratorischen und metabolischen Maxima sowie der Sauerstoffaufnahme und Herzfrequenz an der aeroben und anaeroben Schwelle und einer On-Court-Spiroergometrie im Spiel zur Bestimmung von Leistung, Beanspruchung und Energiebereitstellung im Herreneinzel. Alle Daten wurden mit denselben Messapparaturen nach identischer Kalibrierung erhoben. Die Erhebung der Daten der Hauptuntersuchung erfolgte innerhalb der Wettkampfsaison 2016/2017. Diese erstreckte sich von Mitte Oktober 2016 bis Mitte April 2017. Alle Probanden absolvierten die Laufbandspiroergometrie und die On-Court-Spiroergometrie innerhalb von einer Woche in randomisierter Reihenfolge. Die Nebenuntersuchung wurde von den Probanden, die an beiden Hauptuntersuchungen teilnahmen, unabhängig von den beiden anderen Testungen im gleichen Testzeitraum durchgeführt. Die Spiele innerhalb der On-Court-Spiroergometrie wurden mit einer Videokamera gefilmt und nachträglich die zeitliche Belastungsstruktur sowie die Anzahl und Frequenz theoriegeleitet ausgewählter Aktionen im Spiel erhoben. Die Analyse der Videoaufnahme der einzelnen Spiele fand nach Abschluss aller Tests im Zeitraum von Juni bis September 2017 statt.

Innerhalb der Nebenuntersuchung absolvierten die Probanden eine aus insgesamt zehn Einzeltests bestehende sportmotorische Testbatterie zur Bestimmung des Ausprägungsgrades theoriegeleitet ausgewählter motorischer Fähigkeiten. Die Datenerhebung der Nebenuntersuchung erstreckte sich von Februar 2015 bis März 2017. Zur Gewährleistung einer möglichst hohen Vergleichbarkeit der Daten wurden alle Probanden stets innerhalb der Saison getestet.

Zur Gewährleistung einer möglichst hohen Validität und Reliabilität galten für alle Tests die folgenden Rahmenbedingungen:

- kein intensives Training am Tag vor einer Testung,
- Beibehaltung der Ernährungs- und Trinkgewohnheiten (Protokollierung von Ernährungseigenheiten),
- 24 h vor Testbeginn kein Alkohol,
- ausreichende Flüssigkeitszufuhr vor Testbeginn,
- Durchführung der Testung unter Standardumweltbedingungen,
- Durchführung der Testung zu annähernd gleicher Tageszeit,

- zeitlicher Abstand zwischen zwei Tests von mind. 24 h ohne weitere sportliche Aktivitäten.

Die Probanden wurden vor Beginn der Versuchsreihe sowie im Vorfeld jeder Untersuchung über Form und Ablauf der Testungen aufgeklärt, mittels Anamnesebogen nach eventuellen Kontraindikationen befragt und gaben anschließend ihr Einverständnis zur freiwilligen und unentgeltlichen Teilnahme in schriftlicher Form. Die Studie folgt insgesamt den Vorgaben der Ethikkommission der Philipps-Universität Marburg.

10 Untersuchungsgeräte

10.1 Anthropometrische Messungen

Die Messung der Körpergröße der Probanden erfolgte mittels Wand-Stadiometer vom Boden bis zum höchsten Punkt des Scheitels. Die Messung des Körpergewichts erfolgte mit einer elektronischen Waage der Firma Tanita mit vom Hersteller ausgegebener Kapazität von 220 kg bei einer Auflösung von 0,1 kg. Die gemessenen Ergebnisse wurde auf 0,5 cm bzw. 0,5 kg gerundet.

10.2 Herzfrequenzmessung

Die Herzfrequenzmessung erfolgte mit Hilfe einer Herzfrequenzuhr Typ RS 800 der Firma Polar Electronics GmbH. Die Uhr wurde während der Laufbandspiroergometrie am rechten Handgelenk der Probanden oder aber am Laufband angebracht und während der On-Court-Spiroergometrie am Handgelenk des Nichtschlagarmes getragen. Die Messung der Herzfrequenz erfolgte sekundlich über einen Herzfrequenzsensor, der angefeuchtet auf unterer Sternumhöhe am Thorax mittels Brustgurt befestigt wurde (Polar WearLink® + Coded Transmitter W.I.N.D). Die Auswertung der Herzfrequenzdaten wurde nach Auslesen der Uhr mit der Analysesoftware Polar Pro Trainer 5 vorgenommen. Die Validität der Herzfrequenzmessung mittels Polaruhr wurde in verschiedenen Studien nachgewiesen (Wallén et al., 2012; Quintana et al., 2012; Glies et al., 2016).

10.3 Atemgasmessung

Für die Laufbandspiroergometrie sowie die On-Court-Spiroergometrie wurden zwei offene, nach dem Breath-by-Breath-Messverfahren arbeitende Spiroergometrieeräte des Modells Metamax® 3B und Metamax® 3B-R2 von der Firma Cortex verwendet, die mit einer Messungenauigkeit von $< 2\%$ von Macfarlane et al. (2012) als valide und reliable Messeinheit zur Bestimmung der Sauerstoffaufnahme, Kohlendioxidabgabe und Ventilation bewertet wurden. Um mobile Messungen zu ermöglichen, wurden die Spiroergometer mit kurzer Absaugstrecke betrieben und die Messwerte per Bluetooth oder Telemetrie an die MetaSoft® Studio-Software übermittelt. Diese Software diente neben dem Anlegen von Probanden- und Belastungsprofilen der Registrierung und Überwachung der Atemgasparameter während der Testungen. Die Messung von Atemfrequenz und Atemzugvolumen erfolgte mittels einer digitalen Triple-V-Turbine mit integriertem Volumensensor, welche durch einen Adapter mit einer Maske verbunden wurde. Diese wurde mit Gurten am Kopf befestigt (Cortex

Biophysik GmbH, 2011, S. 11 ff.) und die Gurtverschlüsse zusätzlich mit Klebeband gesichert (Leukotape®). Die Maske wurde innerhalb der Vorbereitung zur jeweiligen Erstuntersuchung der Gesichtsröße entsprechend gewählt, auf Dichtheit überprüft und jedem Probanden eine Turbine zugeordnet. Im anschließenden Folgetest wurden die gleiche Maskengröße sowie die identische Turbine verwendet. Innerhalb der On-Court-Spiroergometrie wurden die Spirometer zum Schutz vor äußeren Luftströmen mit einem zusätzlichen Windshot verwendet.



Abbildung 10.3.1: MetaMax® 3B-Paket (Cortex Biophysik GmbH 2014, S.14)

An jedem Testtag wurde nach 30-minütiger Warmlaufphase eine vollständige Kalibrierung (Raumluft-, Volumen- und Gaskalibrierung) sowie vor jedem neuen Testdurchlauf eine Volumenkalibrierung durchgeführt. Der vom Hersteller angegebene Einsatzbereich (-10 bis $+40^{\circ}\text{C}$, 500 bis 1050 mbar, 0 bis 99% Luftfeuchtigkeit) wurde eingehalten. Innerhalb des Testzeitraumes lagen keine Störungsmeldungen der Selbstdiagnoseprogramme der Spiroergometriegeräte vor.

10.4 Blutlaktatkonzentrationsmessung

Die Messung der Blutlaktatkonzentration wurde basierend auf 20 μl aus dem hyperämisierten Ohrläppchen entnommenen Blut durchgeführt. Zur Blutprobenentnahme wurde das Ohrläppchen ca. zehn Minuten vor Testbeginn mit einer hyperämisierenden Salbe (Finalgon®) eingerieben, unmittelbar vor Teststart mit einer sterilen Einmallinganzette punktiert und anschließend die Blutproben mittels End-to-End-Kunststoffkapillaren entnommen. Dabei wurde darauf geachtet, dass der punktierte Bereich nicht mit Schweiß oder Desinfektionsmittel kontaminiert war. Die gefüllte Kapillare wurde anschließend in eine Eppendorfkapsel mit 200 μl Perchlorsäure gegeben und zum Hämolysieren gut geschüttelt. Bis zur Auswertung wurden die Proben gekühlt aufbewahrt. Es wurde darauf geachtet, dass die Auswertung der Proben innerhalb des vom Hersteller garantierten Zeitraumes für Probenstabilität durchgeführt

wurde. Die Auswertung der Probe erfolgte vollautomatisch mit Hilfe des nach dem enzymatisch-amperometrischen Messprinzips unter Verwendung der Analysesoftware winlactat professional arbeitenden Analysegeräts BIOSEN C-Line Cline der Firma EKF-diagnostic GmbH mit Hilfe von EKF-Chipsensoren. Laut Hersteller liegt der Messbereich für Laktat bei 0,5 bis 40 mmol l⁻¹. Die Messgenauigkeit wird vom Hersteller mit einem Variabilitätskoeffizienten (VK) von $\leq 1,5 \%$ (über zehn Proben bei einer Laktatkonzentration von 12 mmol l⁻¹) angegeben (EKF-diagnostic, 2017).

10.5 Erfassung des subjektiven Beanspruchungsempfindens

Die Abfrage des aktuellen subjektiven Beanspruchungsempfindens erfolgte in Ruhe und am Ende jeder Stufe innerhalb der Laufbandspiroergometrie und vor und nach Ende der verschiedenen Belastungsphasen der On-Court-Spiroergometrie (Warm-Up, Einspielen, Einzelsätze) per Zuweisung eines Wertes zwischen 6 und 20 auf der klassischen RPE-Skala (*Scale of Ratings of Perceived Exertion*) nach Borg & Nobel (1974). Auf der nach dem Erfinder benannten Borg-Skala entspricht jeder ungerade Wert einer charakteristischen Beanspruchung von überhaupt nicht anstrengend (7) bis maximal anstrengend (19). Die Skalierung beruht dabei auf einem identifizierten linearen Zusammenhang von Herzfrequenz und Beanspruchungsempfinden (Löllgen et al., 2010). Die Validität der Borg-Skala im Kontext der Messung von Belastungsintensität wurde unter anderem von Chen et al. (2002) bestätigt. Die Verwendete Borg-Skala ist in Abbildung 10.5.1 dargestellt.

6	
7	Sehr, sehr leicht
8	
9	Sehr leicht
10	
11	Recht leicht
12	
13	Etwas anstrengender
14	
15	Anstrengend
16	
17	Sehr anstrengend
18	
19	Sehr, sehr anstrengend
20	

Abbildung 10.5.1: Borg-Skala (Löllgen, 2004, S. 299).

10.6 Laufbandergometer

Die Laufbandspiroergometrie wurde auf einem Laufbandergometer der Firma h/p/cosmos® vom Typ saturn® durchgeführt. Die Steuerung erfolgte über einen mit dem User-Terminal verbundenen Laptop. Geschwindigkeit und Neigungswinkel wurden über den Laptop kontrolliert. Zur Reduktion des Sturzrisikos befinden sich am Laufband ein Geländer und ein Notstoppschalter. Um darüber hinaus während der Tests gefährliche Stürze zu vermeiden, wurden die Probanden mit einem Fanggurt ausgestattet. Das vom Hersteller angegebene Maximalgewicht wurde nicht überschritten.

10.7 Videoequipment und Videoanalysesoftware

Die Squashspiele innerhalb der On-Court-Spiroergometrie wurden von Beginn der Ruhephase bis zum Beginn der Nachsitzphase aus zentraler, leicht erhöhter Position außerhalb des Courts mit Hilfe einer auf einem Stativ der Firma Manfrotto befestigten Canon Kamera vom Modell LEGRIA HF G30 bei einer Bildrate von 50 Bildern pro Sekunde aufgenommen und anschließend mit Hilfe des Taggingtools der Videoanalysesoftware Dartfish Pro 7.0 analysiert. Die Analysesoftware von Dartfish ermöglicht es, die Videos mit einer um bis zu vierfach verlangsamten oder beschleunigten Geschwindigkeit sowie Bild für Bild abzuspielen und mit unterschiedlichen Tools zu analysieren. Innerhalb dieser Arbeit wurde das Taggingtool von Dartfish verwendet, welches die Erhebung von Häufigkeit, Dauer und Lokalisation im Vorfeld definierter Aktionen ermöglicht. Hierzu werden die zu beobachtenden Aktionen als Ereignisse konstanter oder variabler Länge implementiert. Während beim Taggen von Ereignissen konstanter Länge diesen in der Auswertung lediglich die bisherige Häufigkeit sowie der aktuelle Zeitpunkt zugewiesen wird, wird bei Ereignissen variabler Länge zusätzlich die Dauer der Aktion bis auf die hundertstel Sekunde erfasst. Per Zonentool kann die Aktion darüber hinaus innerhalb einer optional an die Größe des Beobachtungsraumes angepassten Zone lokalisiert werden.

10.8 Zeitmessung

Die Zeitmessung innerhalb der sportmotorischen Testbatterie erfolgte beim Einbeinstand II sowie beim Change-of-Direction-Speed-Test per Stoppuhr. Zur Messung der Laufzeit im 30 m-Sprinttest wurde ein Lichtschrankensystem mit vier Lichtschranken der Firma Brower Timing Systems mit einer Messgenauigkeit von 0,001 s verwendet.

11 Methodisches Vorgehen innerhalb der Hauptuntersuchung

11.1 Laufbandspiroergometrie

Zur Messung der aeroben Leistungsfähigkeit sowie zur Generierung einer individuellen Beurteilungsgrundlage für die körperliche Beanspruchung im Spiel wurde eine stufenförmige Laufbandspiroergometrie bis zur willkürlichen Ausbelastung unter kontinuierlicher Messung von Atemgasen und Herzfrequenz mit punktuellen Blutlaktatkonzentrationsmessungen durchgeführt.



Abbildung 11.1.1: Belastungsphase innerhalb der Laufbandspiroergometrie (Müller, 2016).

Innerhalb der Laufbandspiroergometrie wurde die im Test maximal erreichte Sauerstoffaufnahme bestimmt sowie die Leistung und Beanspruchung an der aeroben und anaeroben Schwelle quantifiziert. Der Laufbandspiroergometrie wurde ein unter Berücksichtigung des Probandenpools als besonders geeignet erscheinendes stufenförmiges Belastungsprotokoll in Anlehnung an die aus den Ergebnissen der Studie von Franke et al. (2009) resultierenden Empfehlungen zur Bestimmung der maximalen Sauerstoffaufnahme bei Sportspielern zu Grunde gelegt. Innerhalb der Testvorbereitung wurden die Empfehlungen zur Gewährleistung einer möglichst hohen Testqualität von Tschopp et al. (2001) eingehalten.

Vor Testbeginn wurden zunächst etwaige Kontraindikationen ausgeschlossen und anschließend das schriftliche Einverständnis der Probanden eingeholt sowie diese einer sportartanamnetischen Befragung zu Spielniveau, Spielstärke, Spielerfahrung und Trainingsgewohnheiten unterzogen. Anschließend wurde das Alter der Probanden notiert und ihre Körpergröße, Armspanne sowie das aktuelle Körpergewicht erhoben. Nach einer zweiminütigen Ruhephase auf dem Laufband unmittelbar vor Testbeginn zur Bestimmung der als Ruhewerte definierten Sauerstoffaufnahme, Blutlaktatkonzentration, Herzfrequenz und subjektiv empfundenen Beanspruchung vor Belastungsstart wurde ein stufenförmiger Belastungstest bei einer Geschwindigkeit von 2 m s^{-1} gestartet und diese in jeder Stufe um $0,2 \text{ m s}^{-1}$ erhöht. Der Neigungswinkel des Laufbandes wurde stufenunabhängig konstant bei 5 % fixiert. Die Stufenlänge betrug jeweils 3 min, um eine der jeweiligen Belastungsstufe entsprechende Blutlaktatkonzentration durch Blutprobenentnahme am Ende der Stufe sicherzustellen. Zwischen den Stufen wurde eine Pause von 30 s absolviert, in der Blut aus dem hyperämisierten Ohrläppchen zur späteren Bestimmung der Blutlaktatkonzentration abgenommen, die subjektive Einschätzung der aktuellen Beanspruchung per Borg-Skala abgefragt und zusammen mit der Herzfrequenz bei Stufenende notiert wurde. Darüber hinaus wurde zum Zeitpunkt des Belastungsabbruchs sowie am Ende der 1., 3., 5. und 7. Nachbelastungsminute eine Blutprobe zur Bestimmung der Post-Belastung-Blutlaktatkonzentration entnommen.



Abbildung 11.1.2: Blutprobenentnahme in einer 30-sekündigen Belastungspause innerhalb der Laufbandspiroergometrie (Müller, 2016).



Abbildung 11.1.3: Untersuchungsequipment innerhalb der Laufbandspiroergometrie (Müller, 2016).

Abbildung 11.1.4 zeigt das entsprechend standardisierte Testprotokoll exemplarisch für acht Stufen. Das Belastungsprotokoll wurde in die Software des Steuersystems eingespeichert und bei jedem Probanden in identischer Form abgerufen.

Stufe	D [min]	v [m s^{-1}]	grad [%]	HR	RPE	BLC
Ruhe	2	0,0	0			
1	3	2,0	5			
2	3	2,2	5			
3	3	2,4	5			
4	3	2,6	5			
5	3	2,8	5			
6	3	3,0	5			
7	3	3,2	5			
8	3	3,4	5			
NB1	1	-	-			
NB3	2	-	-			
NB5	2	-	-			
NB7	2	-	-			

Abbildung 11.1.4: Belastungsprotokoll Laufbandspiroergometrie Squash mit Stufen-dauer D [min], Geschwindigkeit v [m s^{-1}], Steigung grad [%] sowie Herzfrequenz HR, subjektive Beanspruchung RPE und Blutlaktatkonzentration BLC.

Der Test wurde bei vom Probanden signalisierter oder offensichtlicher Ausbelastung abgebrochen. Abbildung 11.1.5 visualisiert das stufenförmige Belastungsprotokoll ebenfalls exemplarisch für acht Stufen.

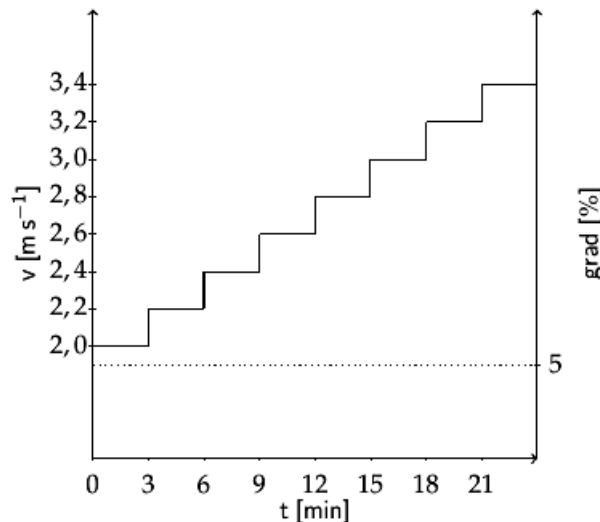


Abbildung 11.1.5: Graphische Darstellung des Belastungsprotokolls der Laufbandspirometrie mit Belastungszeit t [min], Geschwindigkeit v [m s⁻¹] und Steigung grad [%].

Vor der Auswertung der Ergebnisse wurde das Verhalten der leistungsphysiologischen Parameter per Anschauung der 9-Felder-Graphik nach Wassermann auf Plausibilität untersucht. Zur Bewertung der Ausbelastung und der aeroben Leistungsfähigkeit der Probanden sowie zur Generierung einer Beurteilungsgrundlage bzgl. der Beanspruchung im Spiel wurden für jeden Probanden die folgenden Parameter bestimmt:

- Dauer bis zum Testabbruch (D),
- Anzahl der insgesamt (anteilig) absolvierten Stufen,
- anteilige Geschwindigkeit bei Testabbruch (v_{\max}),
- testspezifische maximale Herzfrequenz (HR_{\max}),
- testspezifische maximale relative Sauerstoffaufnahme ($\text{rel } \dot{V}O_{2\max}$),
- testspezifischer maximaler respiratorischer Quotient (RER_{\max}),
- testspezifisch maximales Atemäquivalent ($\dot{V}E/\dot{V}O_{2\max}$),
- testspezifische maximale Blutlaktatkonzentration (BLC_{\max}),
- testspezifisch maximales subjektives Beanspruchungsempfinden (RPE_{\max}),
- testspezifische maximale Herzfrequenz relativ zur Altersnorm ($\%HR_{\max\text{Norm}}$),
- testspezifische maximale Sauerstoffaufnahme relativ zur Altersnorm ($\%\dot{V}O_{2\max\text{Norm}}$),
- sowie die Leistung, Geschwindigkeit, Sauerstoffaufnahme und Herzfrequenz an der aeroben und anaeroben Schwelle ($\dot{V}O_{2BLC2}$, $\dot{V}O_{2BLC4}$, HR_{BLC2} , HR_{BLC4}).

Zur Beurteilung der maximalen Sauerstoffaufnahme und maximalen Herzfrequenz im Vergleich zum Bevölkerungsdurchschnitt wurden die ermittelten Maxima relativ

zum altersspezifischen Normwert für die maximale Herzfrequenz nach Röcker et al. (2002) und zum altersspezifischen Normwert für die maximale Sauerstoffaufnahme nach Wassermann (Kroidl et al., 2010) betrachtet. Die den Berechnungen zu Grunde gelegten Formeln sind dieser Arbeit angehängt (s. Anhang A.2).

Die Leistungsfähigkeit der Probanden wurde an der fixen 2 mmol l^{-1} -Schwelle nach Kindermann et al. (1979) und der anaeroben Schwelle nach Mader et al. (1976) bei einer Blutlaktatkonzentration von 4 mmol l^{-1} bestimmt und diese als fixe aerobe bzw. anaerobe Schwelle bezeichnet. Die aerobe Schwelle wurde darüber hinaus individuell durch den ersten signifikanten Anstieg der Blutlaktatkonzentration im Stufentest definiert, wobei ein Anstieg bei einer Erhöhung der Blutlaktatkonzentration am Ende einer Stufe von $> 0,3 \text{ mmol l}^{-1}$ als signifikant bewertet wurde. Diese Werte dienten dem Vergleich der aeroben Leistungsfähigkeit der Probanden sowie der Beurteilung der metabolischen Auslastung dieser im Spiel.

Die Beurteilung der Ausbelastung der Probanden bei Testabbruch erfolgte unter Berücksichtigung des maximalen respiratorischen Quotienten, des maximalen ventilatorischen Äquivalents für Sauerstoff, der maximalen Blutlaktatkonzentration sowie der subjektiv empfundenen Beanspruchung der Probanden bei Testabbruch. Der Proband galt in Berufung auf de Marées (2003), Koidel et al. (2010) und Rossiter (2010) als ausbelastet, wenn mindestens drei der nachfolgenden Ausbelastungskriterien erfüllt waren:

- Herzfrequenz $\geq 95\%$ der berechneten altersspezifischen maximalen Herzfrequenz,
- Levelling Off der Sauerstoffaufnahme ($< 150 \text{ ml min}^{-1}$),
- respiratorischer Quotient von $> 1,05$,
- Atemäquivalent von > 30 ,
- Blutlaktatkonzentration von $> 8 \text{ mmol l}^{-1}$ und
- subjektives Beanspruchungsempfinden > 18 auf der Borg-Skala.

Abbildung 11.1.6 zeigt exemplarisch einen Auswertungsbogen der durchgeführten Untersuchung.

Leistungstest Squash

Name: xxxxxxxxxx

Alter: 18

Sportart: Squash

BMI: 24

Testdatum: 04.02.2017

Testmodifikation

Testmethode: Laufbandspiroergometrie

Steigung: 5%

Geschwindigkeit: 2+0,2 m/s

Stufendauer: 3 min

Laufband: h/p/cosmos Saturn

Testdaten¹

Vorbelastungswerte: 0,86 mmol/l bLa, 82 bpm HF

Belastungsdauer: 33:00 min

Stufen: 9,5

	AS	Fix 2	Fix 4	Max	% Norm
bLa [mmol/l]	1,94	2	4	9,5	
HF [bpm]	156	157	174	191	
v [m/s]	2,6	2,63	3,2	3,8	
VO ₂ [l/min]	3,78	3,82	4,35	4,84	118
VO _{2ml} [ml/min/kg]	45,76	46,25	52,66	58,6	
%HFmax	82	82	91	100	
%VO ₂ max	78	79	90	100	

Trainingsbereiche²

	REKOM	GA 1	GA 2/TDL	WSA
Prozentbereich (%HF _{ANS})	60-70%	70-90%	90-100%	> 100%
Herzfrequenz	104-129	129-157	157-174	> 174

REKOM: Regenerativer Trainingsbereich

GA 1: Grundlagenausdauer 1

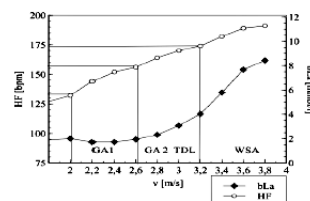
Extensives Ausdauertraining

GA 2: Grundlagenausdauer 2

Intensives Ausdauertraining

TDL: Tempodauerläufe

WSA: Wettkampfspezifische Ausdauer



¹ Schwellenwerte nach Mader A, Liesen H, Heck H, Philippi H, Rost R, Schirch P, Hollmann W. (1976): Zur Beurteilung der sportartspezifischen Ausdauerleistungsfähigkeit im Labor. *Sportarzt und Sportmedizin* 27: 90-98, 109-112.

² Trainingsbereiche nach Kindermann, W. (2004): *Anaerobe Schwelle – Standards der Sportmedizin*. Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin, 55:6, 162-162.

Abbildung 11.1.6: Exemplarischer Ergebnisbericht Laufbandspiroergometrie Squash.

11.2 On-Court-Spiroergometrie

Zur Beurteilung der Beanspruchung sowie der Bestimmung der Energiebereitstellung im aktuellen Herrensquash in Abhängigkeit von Spielniveau und Sieg und Niederlage wurden innerhalb der Probandengruppen Squash national und Squash regional auf Grundlage des Expertenrankings Paarungen möglichst gleichstarker Spieler gebildet. Mit portablen Spiroergometrie geräten ausgestattet wurde bei kontinuierlicher Herzfrequenzmessung, punktueller Blutprobenentnahme sowie Abfrage des subjektiven Beanspruchungsempfindens gegeneinander nach aktuellem Regelwerk ein Herren-einzel ausgetragen, wobei mit sehr langsamen Wettkampfbällen gespielt wurde (s. Kapitel 2.5).



Abbildung 11.2.1: Proband mit portalem Spiroergometriegerät mit Windshot und Pulsuhr mit Schrittzähler in der Probandenvorbereitung innerhalb der On-Court-Spiroergometrie (Müller, 2016).

Nach Lüftung des Squashcourts für mind. 10 min und Vorbereitung der Probanden wurde auf Stühlen auf dem Squashcourt sitzend eine zweiminütige Ruhemessung durchgeführt.



Abbildung 11.2.2: Probanden während der Ruhemessung auf dem Court (Müller, 2016).

Anschließend konnten die Probanden bei Bedarf ein individuelles Warm-Up nach den offiziellen WSF-Regularien (gültig seit 01.01.2014) absolvieren.



Abbildung 11.2.3: Probanden während des individuellen Warm-Ups auf dem Court (Müller, 2016).

Nach kurzer Pause zur Blutprobenentnahme sowie Feststellung von Herzfrequenz und subjektiver Beanspruchung schloss sich die Einspielphase an, in welcher sich die Spieler 5 min auf dem Court mit Seitenwechsel nach 2,5 min und möglichst gleichlanger Ballbesitzzeit für beide Spieler gemeinsam einschlugen. Nach erneuter Pause zur Blutprobenabnahme und Erhebung von Herzfrequenz und subjektiver Beanspruchung sowie kurzer individueller Spielvorbereitung wurde die Partie mit dem ersten Aufschlag begonnen. Das Aufschlagrecht wurde wie auch bei offiziellen Spielen üblich ausgelost. Gespielt wurde nach den offiziellen WSF-Regularien (gültig seit dem 01.01.2014):

- Best-of-Five: drei Gewinnsätze,
- Zählweise PPR 11,
- Pause zwischen den Sätzen: 90 s zuzüglich Warmspielen des Balles nach Ermessen des Schiedsrichters.



Abbildung 11.2.4: Probanden im Spiel innerhalb der On-Court-Spiroergometrie (Müller, 2016).

Die Probanden wurden angehalten, nach jedem Satzball unmittelbar den Court zu verlassen und auf einem Stuhl außerhalb des Courts Platz zu nehmen. Hier wurde in der ersten Nachbelastungsminute nach dem Satzball erneut Blut abgenommen sowie die aktuelle Herzfrequenz und das subjektive Beanspruchungsempfinden abgefragt und notiert. Darüber hinaus wurde die Satzpause größtenteils ruhig sitzend verbracht, um eine möglichst störungsarme Nachatmung zu ermöglichen. Den offiziellen Regularien folgend wurden die letzten 15 s der Satzpause vom Schiedsrichter angekündigt und so die Spieler aufgefordert, sich für den Folgesatz bereitzumachen. Vor Satzbeginn war unabhängig von den 90 s Satzpause ein kurzes Warmspielen des Balles optional.



Abbildung 11.2.5: Proband zu Beginn der Satzpause im Spiel innerhalb der On-Court-Spiroergometrie (Müller, 2016).



Abbildung 11.2.6: Probanden in der Sitzphase der Satzpause im Spiel innerhalb der On-Court-Spiroergometrie (Müller, 2016).

Auch unmittelbar nach dem Matchball nahmen die Spieler an ihrer aktuellen Position auf Stühlen Platz und verbrachten die 30-minütige Nachbelastungsphase möglichst bewegungsarm sitzend, wobei weiterhin die Atemgase und Herzfrequenz gemessen und in der 1., 3., 5., 7., 10 und 15. Nachbelastungsminute Blut entnommen wurde. Zur Gewährleistung einer möglichst bewegungsarmen Nachbelastung der Probanden wurden diesen Testhelfer zur Seite gestellt, die beispielsweise das Abwischen von Schweiß übernahmen.



Abbildung 11.2.7: Probanden während der Ruhemessung in der 30-minütigen Nachbelastung auf dem Court (Müller, 2016).

Der schematische Ablauf der On-Court-Spiroergometrie ist in Abbildung 11.2.8 dargestellt.

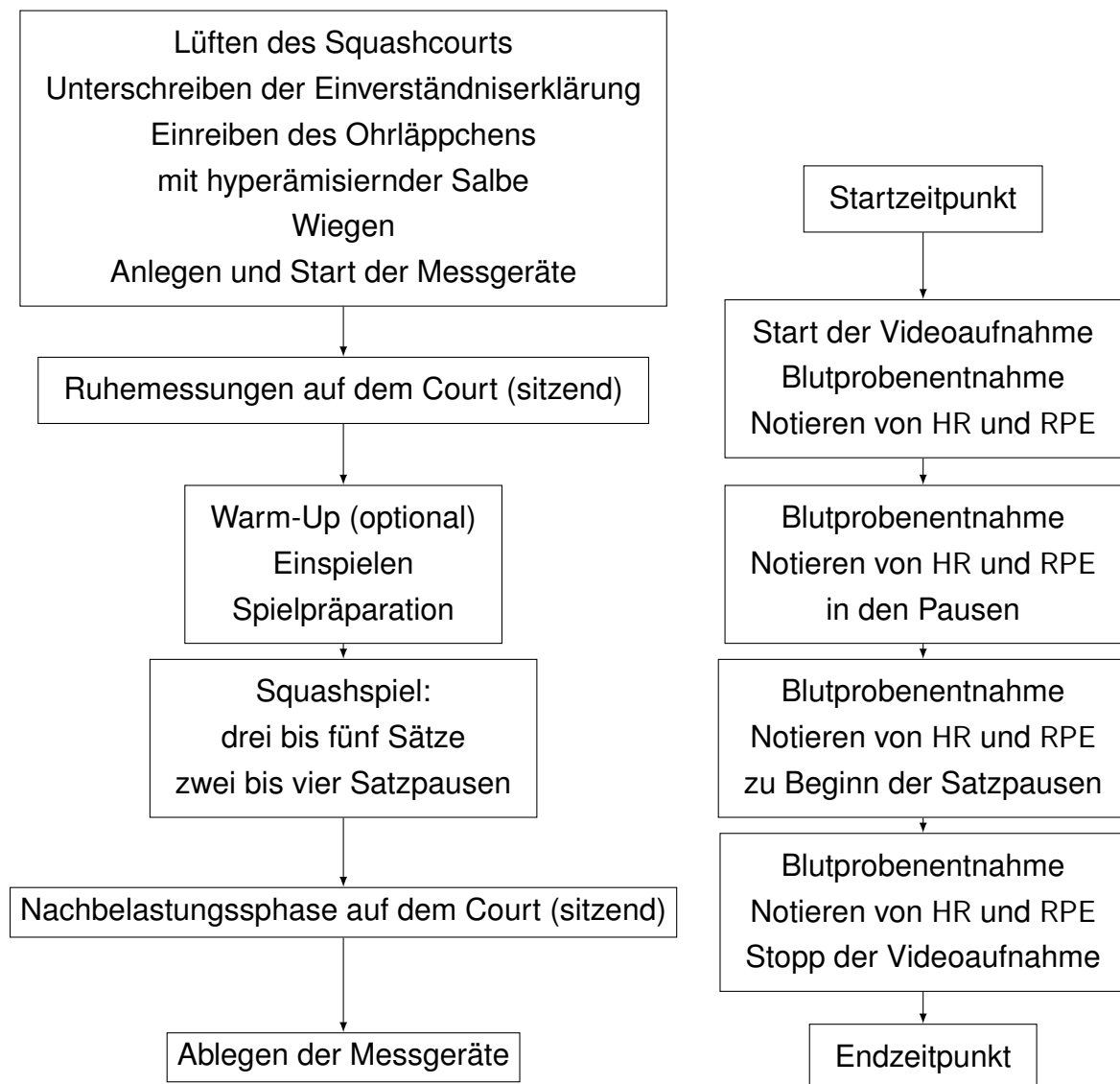


Abbildung 11.2.8: Schematische Darstellung des Untersuchungsablaufs der On-Court-Spiroergometrie.

Zur Beschreibung und Beurteilung der Beanspruchung der Probanden während der Wettkampfsimulation wurden für jeden Probanden die folgenden Parameter erhoben:

- Atemfrequenz (BF),
- Atemminutenvolumen ($\dot{V}E$),
- Sauerstoffaufnahme ($\dot{V}O_2$),
- respiratorischer Quotient (RER),
- Herzfrequenz (HR),
- Blutlaktatkonzentration (BLC) und
- subjektives Beanspruchungsempfinden (RPE).

11.3 Videoanalyse

Bezogen auf die Belastungsstruktur wurde zwischen festen und individuell variierenden Belastungsgrößen unterschieden. Als feste Belastungsgrößen wurden diejenigen bezeichnet, die für beide Spieler einer Partie gleich sind, und diese als zeitliche Strukturelemente der Belastungsstruktur zusammengefasst. Als individuell variierende Belastungsgrößen wurden hingegen die Größen verstanden, die durch Faktoren wie taktisches Verhalten, technisches Vermögen und körperliche Voraussetzungen interindividuell variieren können. In diese Kategorie fallen beispielsweise die Art, Anzahl, Dauer und Frequenz verschiedener Laufaktionen. Basierend auf dieser Unterscheidung wurde eine getrennte Analyse der zeitlichen Belastungsstruktur und der aktivitätsbedingten Belastung differenziert in ein zeitliches Belastungsprofil und ein Aktivitätsprofil vorgenommen.

11.3.1 Zeitliches Belastungsprofil

Zur Erstellung eines zeitlichen Belastungsprofils wurde jedes Spiel in halber Geschwindigkeit analysiert und die Dauer der einzelnen Ballwechsel (DR) sowie der Pausen zwischen den Ballwechseln (RT) mittels Zeitmessfunktion des Analysetools von Dartfish computerunterstützt bis auf die hundertstel Sekunde gemessen. Zusätzlich wurde die Anzahl der Ballwechsel innerhalb der Sätze (R) sowie die Anzahl der Schläge innerhalb eines Ballwechsels (S) gezählt. Aus den auf diese Weise generierten Daten wurden anschließend für jeden Satz die Durchschnittswerte für die folgenden Belastungsparameter berechnet:

- RPT: aktive Spielzeit als Summe der Dauer aller Ballwechsel [s] (engl.: *real playing time*),
- TPT: Dauer eines Satzes als Summe der Dauer aller Ballwechsel und Pausen zwischen den Ballwechseln [s] (engl.: *total playing time*),
- EPT: effektive Spielzeit als aktive Spielzeit in Relation zur Gesamtspielzeit eines Satzes (engl.: *effective playing time*),
- ERR: Relation aus Belastung und Pause als Relation der aktiven und der passiven Spielzeit eines Satzes (engl.: *exercise to rest ratio*),
- TS: Anzahl der Schläge innerhalb eines Satzes (engl.: *total shots*),
- SF_{RPT} : Schlagfrequenz in der aktiven Spielzeit eines Satzes (Anzahl der Schläge pro Minute der aktiven Spielzeit) (engl.: *shot frequency within total playing time*) und
- SF_{TPT} : Schlagfrequenz in der Gesamtspielzeit eines Satzes (Anzahl der Schläge pro Minute der Gesamtspielzeit) (engl.: *shot frequency within real playing time*).

Um eine möglichst hohe Validität des zeitlichen Belastungsprofils zu gewährleisten, wurden die folgenden Definitionen in Übereinstimmung mit den offiziellen Squashregularien getroffen:

- Ballwechsel: Ein Ballwechsel beginnt mit dem Aufschlag und endet mit einem Punkt oder Let.
- Pause zwischen zwei Ballwechseln: Die Pause zwischen zwei Ballwechseln beginnt mit einem Punkt oder Let und endet mit dem darauffolgenden Aufschlag.
- Satz: Ein Satz beginnt mit dem ersten Aufschlag innerhalb eines Satzes und endet mit dem Satzball.
- Spiel: Ein Spiel beginnt mit dem ersten Aufschlag einer Partie und endet mit dem Matchball.
- Satzpause: Die Satzpause beginnt mit dem Satzball und endet mit dem Aufschlag des Folgesatzes.
- Gesamtspielzeit (brutto): Die Brutto-Gesamtspielzeit beschreibt die Dauer einer gesamten Partie beginnend mit dem ersten Aufschlag und endend mit dem Matchball.
- Gesamtspielzeit (netto): Die Netto-Gesamtspielzeit beschreibt die Dauer einer gesamten Partie beginnend mit dem ersten Aufschlag und endend mit dem Matchball abzüglich der Dauer der Satzpausen.
- Schlag: Als Schlag gilt die Berührung des Balles mit dem Schläger innerhalb der aktiven Spielzeit in der Regel nach vorausgehender Ausholbewegung.

11.3.2 Aktivitätsprofil

Hinsichtlich des Aktivitätsprofils war es das Ziel, Bewegungen zu identifizieren, die einerseits mit einer geringen oder hohen Beanspruchung der Spieler korreliert sind und andererseits trennende Größen zwischen den Spielern auf nationalem und regionalem Spielniveau bzw. zwischen Gewinnern und Verlierern innerhalb dieser beiden Gruppen darstellen. Aus leistungsphysiologischer Perspektive erschienen somit vor allem die Bewegungen bedeutsam zu sein, die erfahrungsbasiert als hoch bzw. maximal intensiv eingestuft werden oder die beispielsweise durch eine Beschleunigung des gesamten Spielgeschehens indirekt die Beanspruchung erhöhen könnten sowie Bewegungen bzw. Aktionen, durch die die Beanspruchung während des Spiels reduziert werden könnte. Nach eingehender Befragung von insgesamt fünf Experten (drei sehr erfahrene Spieler mit einer Spielerfahrung von mehr als zehn Jahren auf mind. Landesniveau, zwei Bundestrainer Squash) und unter Berücksichtigung der bisherigen Forschungsergebnisse (s. Kapitel 5) wurden die folgenden Bewegungen als potentiell bedeutsam eingestuft:

- Aktionen, die mit einer maximalen Beanspruchung assoziiert werden:
 - maximale Ausfallschritte,
 - Antritte,
 - Sprünge,
 - harte Richtungswechsel.
- Aktionen, die zu einer Beschleunigung des Spielgeschehens im Sinne einer höheren Aktionsrate führen oder deren Symptom sind und somit indirekt mit einer Beanspruchungserhöhung (für den Gegner) einhergehen könnten:
 - Volleyschläge,
 - Schläge im vorderen Bereich des Courts.
- Aktionen, die zu einer Entschleunigung des Spielgeschehens im Sinne einer geringeren Aktionsrate führen oder deren Symptom sind und somit indirekt mit einer Beanspruchungsreduktion einhergehen könnten:
 - Schläge im hinteren Bereich des Courts,
 - Erreichen der T-Zone vor Ausführung des nächsten Schlages des Gegners,
 - Standzeit in der T-Zone.

Darüber hinaus schien hinsichtlich der Identifikation von Zusammenhängen zwischen Energiebedarf und Bewegungsverhalten eine Unterscheidung der beobachtungs-basiert als dominante Laufbewegungsformen bewerteten Schritte und Sidesteps sinnvoll zu sein. Um über das absolute Ergebnis hinaus mögliche Korrelationen zwischen Punktgewinn und Beanspruchung zu identifizieren, wurde zusätzlich die Anzahl der Winner und Unforced Error der einzelnen Spieler bestimmt. Die mit einer starken Beanspruchung assoziierten Aktionen wurden zur Erhöhung der Vergleichbarkeit mit anderen Studien und zur Reduktion der Datenmenge anschließend als maximal intensive Aktionen zusammengefasst.

Da weder im Regelwerk, noch in der Literatur eine einheitliche Definition des T-Zonen-Bereichs existiert, erschien es zur möglichst validen Erfassung der Parameter der T-Zonen-Nutzung notwendig, den der Analyse zu Grunde liegende Bereich der T-Zone zu definieren. In Kapitel 2.6 wurde bereits die T-Zoneneinteilung nach Vučković et al. (2009) vorgestellt. Da diese laut Bundestrainerteam jedoch aus taktischer Perspektive nicht alle situativen T-Position einschließt, wurde der Bereich in Anlehnung an Hughes & Knight (1995) und Pereira et al. (2001) erweitert (s. nachfolgend Abbildung 11.3.1).

Die Analyse erfolgte mittels eines aus fünf verschiedenen Analyseblöcken (A, B, C, D, E) bestehenden Taggingpanels bei bis um das vierfache reduzierter Geschwindigkeit. Die Analyse wurde für jeden Analyseblock separat vorgenommen und für

jeden Spieler einzeln durchgeführt. Die Taggingspanels enthielten die folgenden Bestandteile:

1. Analyseblock A: Schläge im vorderen/hinteren Bereich des Courts, Schläge mit der Vorhand/Rückhand implementiert als Ereignisse konstanter Länge,
2. Analyseblock B: Sidesteps, Schritte implementiert als Ereignisse konstanter Länge,
3. Analyseblock C: Antritte, maximale Ausfallschritte, Sprünge und harte Richtungswechsel implementiert als Ereignisse konstanter Länge,
4. Analyseblock D: Erreichen der T-Zone vor Ausführung des Folgeschlags des Gegners implementiert als Ereignis konstanter Länge, Standzeit in situativer T-Position implementiert als Ereignis variabler Länge,
5. Analyseblock E: Winner, Unforced Error, Punktgewinn und Letentscheidungen implementiert als Ereignisse konstanter Länge, außergewöhnliche Unterbrechungen implementiert als Ereignis variabler Länge.

Abbildung 11.3.1 zeigt die einzelnen Analyseblöcke als Gesamtaggingpanel in Dartfish.

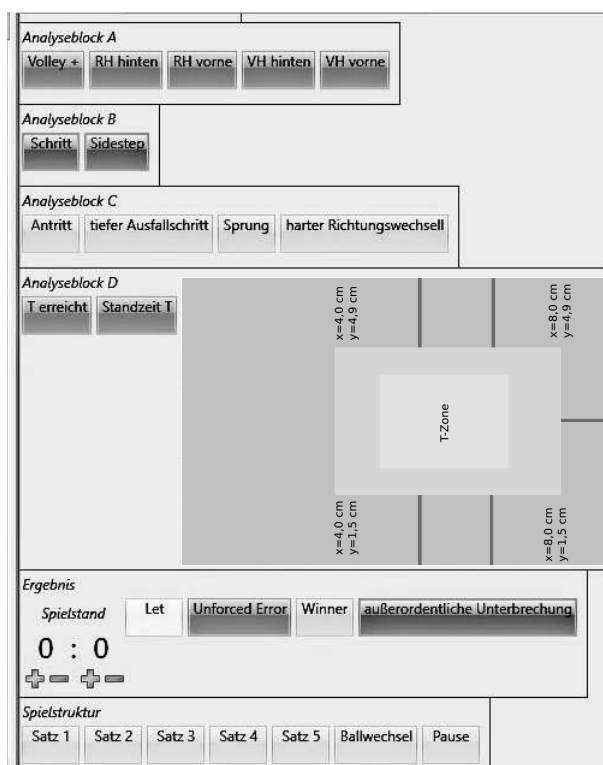


Abbildung 11.3.1: Adaptiertes Taggingpanel mit den verschiedenen Analyseblöcken zur Erstellung des Aktivitätsprofils.

Die Videoanalyse wurde auf Grund der Diffizilität der Entscheidung von einem zweiköpfigen Expertenteam nach eingehender Einarbeitung vorgenommen.

Zur Gewährleistung einer möglichst hohen Datenqualität wurden die zu beobachtenden Aktionen im Vorfeld der Analyse wie folgt definiert:

- Schlag vorne: Schlag, der vor der horizontalen T-Linie ausgeführt wird.
- Schlag hinten: Schlag, der hinter der horizontalen T-Linie ausgeführt wird.
- maximaler Ausfallschritt: Ausfallschritt, der zum Erreichen eines in maximaler Reichweite liegenden Balles erfolgt.

Für maximale Ausfallschritte wurden beobachtungsbasiert die folgenden Charakteristika definiert:

- Treffen des Balles in Bodennähe definiert als Treffpunkte unterhalb des Knies eines Spielers,
- Schlag mit (fast) gestrecktem Arm ohne oder mit wenig ausladender Ausholbewegung,
- angesprungener Schritt,
- Hinterherschleifen des hinteren Fußes,
- Fuß des Schlagarms ist vorne,
- stumpfer Winkel zwischen Ober- und Unterschenkel des vorderen Beines.

Bei Beobachten von mindestens drei der genannten sechs Merkmale wurde ein Ausfallschritt als maximaler Ausfallschritt registriert.

- Antritt: Mehr als zwei hintereinander ausgeführte Schritte mit initial in Relation zur sonstigen Schrittlänge großem Schritt, die optisch eine deutlich wahrnehmbare bzgl. der Bewegungsrichtung eindimensionale Erhöhung der Bewegungsgeschwindigkeit für wenige Sekunden zur Folge haben. Der Körperschwerpunkt ist dabei nach vorne verlagert.
- Sprung: Abschnellen des Körpers vom Boden mit kurzer Flugphase des gesamten Körpers,
- Volley: Schlagen des Balles, bevor der Ball nach Kontakt mit der Stirnwand den Boden berührt,
- harter Richtungswechsel: Richtungswechsel entgegen der aktuellen Bewegungsrichtung mit vorausgehender offensichtlicher Bewegung in die andere Richtung (Taxi),
- T erreicht: gemessene Standzeit in der T-Zone $\leq 0,05$ s,
- Standzeitpunkt T: gemessene Standzeit in der T-Zone $> 0,05$ s,
- Standzeit T: gemessene Standzeit der Standzeitpunkte in der T-Zone.

Der Startzeitpunkt der Messung wurde als Moment des Einnehmens und der Endzeitpunkt als Auflösen der Ballerwartungsposition definiert. Leichte Bewegung zum Erhalt der Handlungsbereitschaft innerhalb der Wartezeit wurden nicht als Auflösen der Position gewertet.

- Winner: Schläge, die aktiv zum Punktgewinn führen und keine Unforced Error sind. Auszuschließend sind Bälle, die unbeabsichtigt gespielt werden und trotzdem zu einem Punktgewinn führen (unberechenbare Bälle).
- Unforced Error: Bälle, die in keiner ersichtlichen Drucksituation tief- oder ausgeschlagen werden.

11.4 Erstellung des energetischen Profils Squash

In Kapitel 6.3 wurde allgemein dargestellt, wie sich aus der in Ruhe, während einer Belastung und nach Belastungsende gemessenen Sauerstoffaufnahme, Kohlendioxidabgabe und Blutlaktatkonzentration unter optionaler Berücksichtigung des Körpergewichts die bereitgestellte Energiemenge und der Energieumsatz eines Organismus sowie die anteilige Energiebereitstellung der einzelnen Energiestoffwechsel berechnen lassen. Nachfolgend wird erläutert, wie dies konkret auf die Sportart Squash übertragen wurde.

Auf Grund der intermittierenden Belastungsstruktur wurde die Wettkampfzeit zunächst in zwei energetisch relevante Phasen unterteilt:

1. Belastungsphasen:

- individuelles Warm-Up vom Start bis zum Ende der Aktivität,
- Einspielzeit beginnend mit dem ersten und endend mit dem letzten Schlag,
- Spielzeit der einzelnen Sätze beginnend mit dem ersten Aufschlag und endend mit dem Satzball,
- Warmspielzeit unmittelbar vor Satzbeginn.

2. Erholungsphasen:

- Pause zwischen dem Warm-Up und dem Einspielen bzw. dem Einspielen und dem Beginn des ersten Satzes jeweils beginnend mit Ende der Aktivität der vorherigen und endend mit Beginn der Aktivität der nachfolgenden Belastungsphase,
- Satzpausen: Pausen zwischen den Sätzen beginnend mit dem Satzball und endend mit dem ersten Aufschlag des nachfolgenden Satzes,
- Nachbelastungsphase: 30-minütige sitzende Erholung auf dem Court unmittelbar nach dem Matchball.

Diese Unterteilung wurde weiter ausdifferenziert, indem die Satzpausen in eine Aktivitätsphase (A) und eine Sitzphase (S) eingeteilt wurden. Die Aktivitätsphase setzte sich wiederum aus einer initialen Gehphase (G) zu Beginn der Satzpause und einer Vorbereitungs- und Warmspielphase¹ (WS) am Ende der Satzpause zusammen. Die Phasen wurden unter Berücksichtigung der aus den Videoaufnahmen bestimmten Dauer der einzelnen Phasen innerhalb der spiroergometrischen Messprotokolle wie folgt identifiziert:

- Beginn der Gehphase: Markierung im Messprotokoll am Satzende, sichtbarer (monotoner) Abfall der Sauerstoffaufnahme,
- Beginn der Sitzphase: steiler (streng monotoner) Abfall der Sauerstoffaufnahme in der Satzpause,
- Ende der Sitzphase mit Beginn der Warmspielphase,
- Beginn der Warmspielphase: sichtbarer (monotoner) Anstieg der Sauerstoffaufnahme in der Satzpause,
- Ende der Warmspielphase mit Beginn des nachfolgenden Satzes: Markierung im Messprotokoll, erneuter, deutlich sichtbarer ² (streng monotoner) Anstieg der Sauerstoffaufnahme.

Abbildung 11.4.1 zeigt ein Modell einer exemplarischen Einteilung der Sauerstoffaufnahme in der Satzpause zwischen zwei Sätzen in eine initiale Gehphase, eine Sitzphase und eine Warmspielphase.

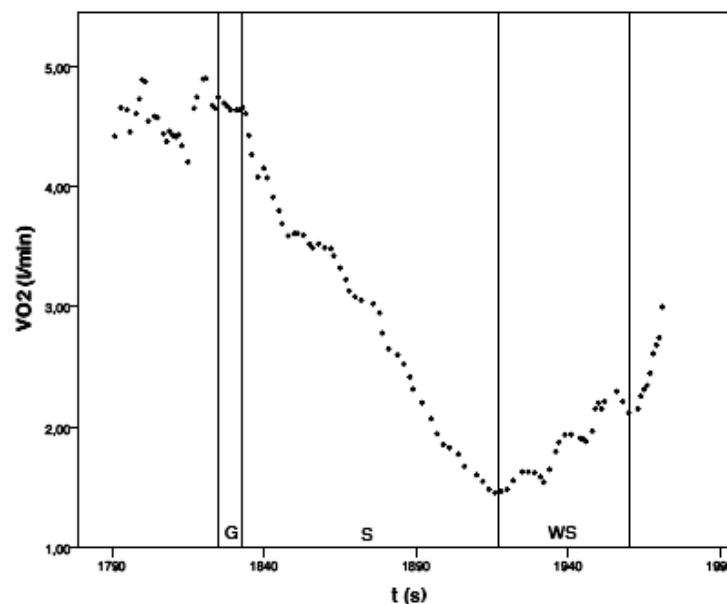


Abbildung 11.4.1: Modell einer exemplarischen Phaseneinteilung der Sauerstoffaufnahme in der Satzpause mit initialer Gehphase (G), Sitzphase (S) und Warmspielphase (WS).

¹Nachfolgend wird diese Phase unabhängig von der Art der Aktivität als Warmspielphase bezeichnet.

²Steilerer Anstieg der Sauerstoffaufnahme im Vergleich zur vorangegangenen Warmspielphase.

Zunächst wurde nach klassischer Berechnungsmethode auf der Grundlage der durchschnittlichen Sauerstoffaufnahme und der Nettoblutlaktatakkumulation der einzelnen Sätze sowie der schnellen Komponente der Nachatmung während der Sitzphase der jeweiligen Satzpausen bzw. nach Spielende ein konservatives energetisches Profil erstellt. Da davon ausgegangen werden kann, dass die in den Sitzphasen über dem Ruhenniveau aufgenommene Sauerstoffmenge primär den metabolischen Regenerationsvorgängen dient (s. Kapitel 6.3), wurden diese somit als „sicher“ bezeichnbare Phasen zunächst als Berechnungsgrundlage genommen, um eine Überbewertung des PCr-Paybacks zu vermeiden. Wie bereits in Kapitel 6.2 dargestellt wurde, kann jedoch davon ausgegangen werden, dass in Erholungsphasen leichter Aktivität ($\leq 40\%$ der $\dot{V}O_{2\max}$) die PCr-Resynthese zwar um bis zu 20 % reduziert ist, aber dennoch weiter stattfindet. Somit erschien es legitim, in einem ersten Schritt auch die initialen Gehphasen der Satzpausen bei Interpretation von Gehen auf Grund eines hierfür nach de Marées (2003) zu veranschlagenden Energiebedarfs von ca. 3 J m^{-1} als leichte Aktivität in die Berechnung miteinzubeziehen. Der Beginn der Warmspielphase wurde hingegen als Ende der Sauerstoffaufnahme zur Kreatinphosphatresynthese definiert. Diese Definition basiert auf der Annahme, dass ab diesem Zeitpunkt durch erneuten Aktivitätsbeginn keine PCr-Resynthese mehr stattgefunden haben kann. Da innerhalb des konservativen Modells auch die Laktatelimination und PCr-Resynthese in den Pausen zwischen den Ballwechseln, welche ebenfalls durch die Aktivitäten Gehen oder Stehen dominiert waren, nicht berücksichtigt wurden, wurde das Modell anschließend nochmal erweitert, um die Beteiligung der anaeroben Energiestoffwechsel an der Energiebereitstellung im Squash genauer abzuschätzen.

Im Anschluss an die Berechnung der aeroben, anaerob alaktaziden und anaerob laktaziden Energiemengen der einzelnen Sätze wurden diese zum Gesamtenergieverbrauch W_{TOT} aufsummiert und die einzelnen Energiebeträge durch den Gesamtenergieverbrauch relativiert als prozentuale Anteile dessen ausgedrückt. Die metabolische Leistung (P_{TOT}) wurde durch Division des Gesamtenergieverbrauchs durch die Belastungsdauer als Energie pro Zeit in W s^{-1} sowie hochgerechnet auf eine Stunde in kJ h^{-1} angegeben.

11.4.1 Berechnung der aerob bereitgestellten Energiemenge

Die pro Satz insgesamt aufgenommene Sauerstoffmenge wurde als Produkt der durchschnittlichen Sauerstoffaufnahme und der Belastungsdauer des jeweiligen Satzes bestimmt (s. Kapitel 6.3.1). In Anlehnung an Beneke et al. (2014) wurde eine Ruhesauerstoffaufnahme von $4,5 \text{ ml kg}^{-1} \text{ min}^{-1}$ als Äquivalent der Ruhesauerstoffaufnahme im Stehen veranschlagt und so die während der einzelnen Sätze unter Ruhebedingungen aufgenommenen Sauerstoffmenge geschätzt. Durch Subtraktion der geschätzten $\dot{V}O_{2R}$ von der innerhalb des jeweiligen Satzes insgesamt aufgenom-

menen Sauerstoffmenge wurde die Nettosauerstoffaufnahme $VO_{2\text{NET}}$ für alle Sätze berechnet. Im Anschluss wurde der durchschnittliche respiratorische Quotient der einzelnen Sätze bestimmt und ein diesem entsprechendes kalorisches Äquivalent unter Verwendung der in Tabelle A.1 (s. Anhang A.1) dargestellten Zuordnung gewählt. Die in den einzelnen Sätzen aerob bereitgestellte Energiemenge wurde anschließend mit Formel (6.3.1) aus Kapitel 6.3.1 berechnet.

11.4.2 Berechnung der anaerob alaktazid bereitgestellten Energiemenge

Die Berechnung der anaerob alaktazid bereitgestellten Energiemenge basierte auf Formel (6.3.4) aus Kapitel 6.3.2. Zur Berücksichtigung der intermittierenden Belastungsstruktur eines Squashspiels wurde neben der der schnellen Komponente der Nachatmung in der 30-minütigen Nachbelastungsphase zuzuordnenden Sauerstoffmenge auch die Sauerstoffaufnahme in den unterschiedlichen, sich während des Spiels ergebenden Belastungspausen in Abhängigkeit der jeweiligen Aktivitäten anteilig der Resynthese von Kreatinphosphat zugeordnet.

Konservatives Berechnungsmodell:

Die der PCr-Resynthese in der 30-minütigen Nachbelastungsphase nach Ende des finalen Satzes zurechenbare Sauerstoffmenge wurde wegen $0 < \tau_a < 1$ für alle Modelle und somit $T = 30 \gg 4 \cdot \tau_a > 0$ mit der in Kapitel 6.3.2 beschriebenen Abschätzung bestimmt. Vor der Berechnung der der geschätzten Sauerstoffmenge entsprechenden Energiemenge wurde die Validität des die Sauerstoffkinetik der Nachatmung beschreibenden mathematischen Modells überprüft und das Modell nur dann als ausreichend valide bewertet, wenn die innerhalb der Nachatmung der Rephosphorylierung von Kreatinphosphat zuzuordnende Sauerstoffmenge $VO_{2\text{PCrNB}}$ die im Vorfeld berechnete individuelle maximale zur Rephosphorylierung des gesamten unter normalen körperlichen Voraussetzungen in der Muskulatur gespeicherten Kreatinphosphats benötigte Sauerstoffmenge $VO_{2\text{PCrNorm}}$ nicht überstieg (s. Kapitel 11.4.2). Die sich daraus ergebende Bedingung

$$VO_{2\text{PCrNB}} := a \cdot \tau_a \leq VO_{2\text{PCrNorm}} \quad (11.4.1)$$

stellte somit das erste Validitätskriterium der Berechnungsmethodik dar.

Dem Berechnungsschema der in den Pausen zwischen zwei Sätzen der Rephosphorylierung von Kreatinphosphat zuzuordnenden Sauerstoffmenge wurde die Phaseneinteilung aus Kapitel 11.4 zu Grunde gelegt. Zur Generierung eines mathematischen Berechnungsmodells wurden zunächst die verschiedenen Phasen der Satzpause wie folgt als Zeiträume in \mathbb{R}^+ definiert:

- Satzpause $P := [s, T] \subset \mathbb{R}^+$ mit Anfangspunkt $s = 0$ und Endzeitpunkt $T > 0$ der Pause,
- Gehphase $G := [s, t_1] \subset P$ mit Anfangspunkt $s = 0$ und Endzeitpunkt t_1 , $0 < t_1 < T$, der initialen Gehphase der Pause,
- Sitzphase $S := [t_1, t_2] \subset P$ mit Anfangspunkt $t_1 > 0$ und Endzeitpunkt t_2 , $t_1 < t_2 < T$, der Sitzphase der Pause und
- Warmspielphase $WS := [t_2, T] \subset P$ mit Anfangspunkt t_2 , $t_1 < t_2 < T$, und Endzeitpunkt $T > 0$ der Pause.

Die Dauer einer Phase wurde als Differenz der oberen und unteren Intervallgrenzen in Sekunden bestimmt und in Dezimalminuten umgewandelt.

Die der PCr-Resynthese in den Pausen zwischen zwei Sätzen zurechenbare Sauerstoffmenge wurde wie folgt berechnet:

1. Berechnung der Sauerstoffaufnahme der schnellen Komponente bei theoretisch vollständiger EPOC:

$$VO_{2PCrP_{TOT}} := a_P \cdot \tau_a \quad (11.4.2)$$

mit entsprechender Amplitude der Sauerstoffaufnahme der schnellen Komponente a_P [ml min^{-1}] und Zeitkonstante τ_a [min].

2. Überprüfung der Modellvalidität durch erneuten Vergleich der Sauerstoffaufnahme der schnellen Komponente bei theoretisch vollständiger EPOC mit dem berechneten Normwert $VO_{2PCr_{Norm}}$:

$$VO_{2PCrP_{TOT}} \leq VO_{2PCr_{Norm}} \quad (11.4.3)$$

Formel (11.4.3) stellte das zweite Validitätskriterium der Berechnungsmethodik dar.

3. Schätzung der Sauerstoffaufnahme der schnellen Komponente der EPOC in der Sitzphase S der Satzpause :

$$VO_{2PCr_S} := \int_{t_1}^{t_2} a_P \cdot e^{\frac{-t}{\tau_a}} dt,$$

mit entsprechender Amplitude der Sauerstoffaufnahme der schnellen Komponente a_P [ml min^{-1}] und Zeitkonstante τ_a [min].

Modellerweiterung: Stufe I

1. Schätzung der Sauerstoffaufnahme der schnellen Komponente der EPOC in der initialen Gehphase der Satzpause P unter der Annahme einer um 20 % reduzierten PCr-Resynthese:

$$VO_{2PCrG} := 0,8 \cdot \int_0^{t_1} a_P \cdot e^{\frac{-t}{\tau_a}} dt$$

mit entsprechender Amplitude der Sauerstoffaufnahme der schnellen Komponente a_P [ml min^{-1}] und Zeitkonstante τ_a [min].

2. Berechnung der unter den getroffenen Annahmen insgesamt der Resynthese von Kreatinphosphat in der Satzpause zuzuordnende Sauerstoffmenge:

$$VO_{2PCrP}^* := VO_{2PCrS} + VO_{2PCrG}$$

3. Berechnung der während der Warmspielphase insgesamt aufgenommenen Bruttosauerstoffmenge VO_{2WS} :

$$VO_{2WS} := \dot{VO}_{2WS} \cdot (T - t_2)$$

mit durchschnittlicher Sauerstoffaufnahme in der Warmspielphase \dot{VO}_{2WS} [$\text{ml kg}^{-1} \text{min}^{-1}$].

4. Schätzung der unter der Annahme einer uneingeschränkt ablaufenden schnellen Komponente der Nachatmung in Pause P dieser potentiell zuzuordnenden Sauerstoffmenge als der Dauer von P entsprechenden Fraktion der modellierten Sauerstoffaufnahme der EPOC der Nachbelastungsphase:

$$VO_{2EPOC_{GUS}} := \int_0^{t_2} a_P \cdot e^{\frac{-t}{\tau_a}} + b_P \cdot e^{\frac{-t}{\tau_b}} + c dt$$

mit entsprechenden Amplituden der Sauerstoffaufnahme der schnellen und langsamen Komponente a_P , b_P [ml min^{-1}] und Zeitkonstanten τ_a , τ_b [min] sowie Ruhesauerstoffaufnahme c [ml min^{-1}].

5. Berechnung der innerhalb der Satzpause insgesamt aufgenommenen Sauerstoffmenge:

$$VO_{2P} := \dot{VO}_{2P} \cdot (T - s)$$

mit durchschnittlicher Sauerstoffaufnahme in der Satzpause \dot{VO}_{2P} [$\text{ml kg}^{-1} \text{min}^{-1}$].

6. Überprüfung der Modellvalidität durch Vergleich der innerhalb der Satzpause insgesamt aufgenommenen Sauerstoffmenge mit der unter der Annahme einer in der initialen Gehphase um 20 % verminderten schnellen Komponente modellierten:

$$VO_{2p} \geq (VO_{2EPOC_{GUS}} - 0,2 \cdot VO_{2PCrG}) + VO_{2WS}. \quad (11.4.4)$$

Formel (11.4.4) stellte das dritte Validitätskriterium der Berechnungsmethode dar.

Die Berechnung der den geschätzten Sauerstoffmengen entsprechenden Energiebeiträge erfolgte unter Verwendung von Formel (6.3.4).

Modellerweiterung: Stufe II

Innerhalb der zweiten Stufe der Modellerweiterung wurde die Sauerstoffaufnahme der schnellen Komponente der Nachatmung in den Pausen zwischen den Ballwechseln unter Verwendung der durchschnittlichen Anzahl der Pausen pro Satz ($R - 1$), ihrer durchschnittlichen Länge (RT [min]) sowie der Sauerstoffamplitude (a [$l \cdot min^{-1}$]) und der Zeitkonstante (τ_a [min]) der PCr-Resynthese der Modellfunktion der Nachbelastungssauerstoffkinetik für jeden Probanden geschätzt. Die während der Spielunterbrechungen der Rephosphorylierung von Kreatinphosphat zuzuordnende Sauerstoffmenge wurde durch

$$VO_{2PCr_{RT}} := (R - 1) \cdot 0,8 \cdot \int_0^{RT} a \cdot e^{\frac{-t}{\tau_a}} dt,$$

für jeden Probanden berechnet, wobei R der durchschnittlichen Anzahl der Ballwechsel pro Satz innerhalb des jeweiligen Spiels entsprach. Anschließend wurde unter Veranschlagung eines dem zugehörigen durchschnittlichen respiratorischen Quotienten entsprechenden kalorischen Äquivalentes erneut mit Formel (6.3.4) die der Sauerstoffaufnahme entsprechende Energiemenge berechnet.

Physiologische Limitierung der PCr-Resynthese

Um zu überprüfen, ob die geschätzten Sauerstoffmengen zur PCr-Resynthese physiologisch plausiblen Größen entsprachen, wurde auf der Grundlage physiologischer Mechanismen für die einzelnen Probanden Minimal-, Norm- und Maximalwerte berechnet. Hierzu wurden literaturbasiert die folgenden Annahmen getroffen (Harris et al., 1974; Rositter, 2010):

- Der Muskelanteil der Probanden liegt zwischen 37 – 56 % der Körpermasse.
- Der normale Muskelanteil eines Mannes liegt bei 40 % der Körpermasse.
- Der menschliche Körper besitzt normalerweise 15 – 20 mmol Kreatinphosphat pro kg Muskelfeuchtmasse. Es können bei spezifisch Trainierten jedoch auch bis zu 35 mmol Kreatinphosphat pro kg Muskelfeuchtmasse enthalten sein.

Darüber hinaus wurden folgende ebenfalls aus der Literatur abgeleitete Fakten verwendet (Nelson & Cox, 2011):

- 1 mol Kreatinphosphat wiegt 131 g.
- Zur Resynthese von 1 mol Kreatinphosphat wird 1 mol ATP benötigt.
- 6 mol O₂ liefern 28 mol ATP.
- 1 mol O₂ wiegt 32 g.
- 32 g O₂ sind in 22,4 l O₂ enthalten.

Nach obiger Darstellung werden unter Standardnormalbedingungen zur Resynthese von 1 mol PCr folglich 4,8 l O₂ benötigt. Somit ergibt sich die folgende Formel zur Berechnung der für die Resynthese des gesamten im Körper vorhandenen Kreatinphosphats unter Normalbedingungen benötigte Sauerstoffmenge $VO_{2PCr_{Norm}}$:

$$VO_{2PCr_{Norm}} := \text{Körpergewicht [kg]} \cdot \text{Muskelanteil [\%]} \cdot 0,01 \\ \cdot \text{Kreatinphosphat [mol kg}^{-1}] \cdot 4,8 [\text{l mol}^{-1}].$$

Mit Hilfe der obigen Formel wurden die in Tabelle A.2 dargestellten Werte (s. Anhang) für alle Probanden berechnet, wobei zur Berechnung des Normwertes 20 mmol Kreatinphosphat pro kg Muskelfeuchtmasse und ein Muskelanteil von 40 % veranschlagt wurden. Darüber hinaus wurde für alle Probanden unter Veranschlagung der oben genannten Extrema hinsichtlich Kreatinphosphat und Muskelanteil eine Unter- ($VO_{2PCr_{min}}$) und eine Obergrenze ($VO_{2PCr_{max}}$) berechnet.

11.4.3 Berechnung der anaerob laktazid bereitgestellten Energiemenge

Konservatives Berechnungsmodell:

Der konservativen Berechnung der während des Squashspiels bzw. der einzelnen Sätze anaerob laktazid bereitgestellten Energiemenge wurde Formel (6.3.3) aus Kapitel 6.3.3 zu Grunde gelegt. Auch hier wurde die intermittierende Belastungsstruktur berücksichtigt, in dem die Nettolaktatproduktion für alle Sätze einzeln als Differenz aus der Blutlaktatkonzentrationen unmittelbar vor Satzbeginn und nach Satzende bestimmt wurde. Dabei wurde mit BLC_{P_0} die nach dem Einspielen (P_0), mit BLC_{P_i} für $1 \leq i \leq m \leq 4$ die in den $2 \leq m \leq 4$ Pausen zwischen den insgesamt $n := m + 1$ Sätzen und mit BLC_{NB_k} für $k \in \{1, 3, 5, 7, 10, 15\}$ die zu den einzelnen Messzeitpunkten der Nachbelastung gemessene Blutlaktatkonzentration bezeichnet. Ausgehend von dem in der ersten Nachbelastungsminute gemessenen Laktatwert BLC_{P_i} wurde mit Hilfe der Modellfunktion der Laktatabfallkinetik nach Belastungsende $BLC(t)$ (s. Kapitel 6.2) der Blutlaktatkonzentrationsabfall in Abhängigkeit der Pausendauer $T_i > 0$ für alle P_i mit $0 \leq i \leq m \leq 4$ berechnet und die Differenz aus dem nach Satzende gemessenen Wert und dem berechneten Konzentrationsabfall

$$BLC_{P_{iEND}} := BLC_{P_i} - (BLC(0) - BLC(T_i))$$

als Ausgangswert zur Berechnung der Nettolaktatbildung des Nachfolgesatzes gewählt. Unter Berücksichtigung eines auf Grund potentiell verschiedener Beanspruchung in den einzelnen Sätzen sowie einer möglichen enzymatischen Hemmung der Glykolyse im Spielverlauf nicht zwingend monotonen Anstiegs der Blutlaktatkonzentration wurden anschließend die folgenden Definitionen getroffen:

$$\Delta BLC_i := \begin{cases} \Delta^* BLC_i, & \text{wenn } \Delta^* BLC_i > 0 \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

mit

$$\begin{aligned} \Delta^* BLC_i &:= BLC_{P_i} - BLC_{P_{i-1END}} \text{ für } 1 \leq i \leq n \leq 5 \text{ und} \\ BLC_{P_n} &:= BLC_{NB_{max}} = \max(BLC_{NB_1}, \dots, BLC_{NB_{15}}), \end{aligned}$$

wobei ΔBLC_i die dem i -ten Satz zugeordnete Nettoblutlaktatproduktion bezeichnet.

Die Berechnung der anaerob laktazid bereitgestellten Energiemenge erfolgte unter Verwendung eines auf der Annahme eines Laktat-Verteilungsraumes von ca. 45 % der Körpermasse basierenden O_2 -Laktat-Äquivalents von $3 \text{ ml } O_2 \text{ kg}^{-1} \text{ pro mmol l}^{-1}$ Blutlaktat (di Prampero et al., 1981, Beneke et al., 2004) mit Formel (6.3.3). Die so berechnete anaerob laktazid bereitgestellte Energiemenge wurde analog zu Kapitel 11.4.2 als sichere Größe eingestuft und bildet innerhalb des konservativen energeti-

schen Modells die Grundlage zur Beurteilung der Beteiligung des anaerob laktaziden Energiestoffwechsels an der Energiebereitstellung im Squash.

Modellerweiterung: Stufe III

Unter Berücksichtigung der Laktatelimination in den Pausen zwischen den Ballwechseln wurde das Modell auch hinsichtlich der anaerob laktaziden Komponente erweitert. Hierzu wurde auf Basis der Modellfunktionen der Laktatabfallkinetik der Nachbelastung $BLC(t)$ und der durchschnittlichen Dauer der Pausen zwischen den Ballwechseln (RT [min]) pro Satz innerhalb des jeweiligen Spiels zunächst die durchschnittliche Blutlaktatelimination pro Pause zwischen den Ballwechseln für jeden Probanden berechnet und anschließend die während eines durchschnittlichen Satzes in den Pausen zwischen den Ballwechseln eliminierte Menge Blutlaktat Δ^+BLC [mmol l^{-1}] analog zur zweiten Stufe der Modellerweiterung als Produkt aus dieser und der durchschnittlichen Anzahl der Pausen $R - 1$ geschätzt:

$$\Delta^+BLC := (R - 1) \cdot (BLC(0) - BLC(RT)).$$

Mit Formel (6.3.4) wurde im Anschluss die Δ^+BLC entsprechende Energiemenge berechnet.

12 Methodisches Vorgehen innerhalb der Nebenuntersuchung

12.1 Sportmotorische Testbatterie

Zur Messung der Leistungsfähigkeit hinsichtlich für die Spielleistung im Squash potentiell bedeutender motorischer Fähigkeiten wurde eine spezifische Testbatterie nach sich in der Praxis etablierten Vorbildern zusammengestellt. Innerhalb der Testbatterie wurden ausschließlich Tests verwendet, die wissenschaftlich belegt den Gütekriterien genügen. Zur Gewährleistung einer möglichst hohen Validität wurde bei der Testauswahl darüber hinaus auf eine möglichst motivationunabhängige Leistungserbringung geachtet. Um eine möglichst hohe Vergleichbarkeit der Tests zu gewährleisten, wurden alle Testdurchläufe unter unmittelbar vergleichbaren räumlichen Gegebenheiten durchgeführt. Um das Fehlerpotential hinsichtlich Mess- und Ablesegenauigkeit bei der Leistungsmessung innerhalb der einzelnen Tests der Testbatterie möglichst gering zu halten, wurde der Einsatz des jeweils immer gleichen Versuchsleiters angestrebt. Alle Versuchsleiter waren sportwissenschaftlich geschult und mit den einzelnen Tests und Messmethoden vertraut. Die Testbatterie setzte sich aus zehn einzelnen Tests zusammen, die unter Berücksichtigung der jeweiligen Testanforderungen in spezifischer Reihenfolge absolviert wurden. Zwischen den einzelnen Übungen und Wiederholungen wurden den Probanden eine Erholungszeit von fünf bis zehn Minuten gewährt. Vor Beginn der Testserie absolvierten die Probanden ein standardisiertes Aufwärmprogramm zur Mobilisation und Vorbereitung auf die kommenden körperlichen Anforderungen. Die Testbatterie wurde in folgender Testfolge durchlaufen:

1. Beweglichkeitstest
2. Reaktionsschnelligkeitstest
3. Koordinationstests (I+II)
4. Agilitätstest
5. Sprinttest
6. Krafttests (I-III)
7. Ausdauerleistungstest.

Basierend auf den Erfahrungen der Vortestungen im Vorfeld der Studie wurden die zuvor aus neun Tests bestehende Testbatterie auf Grund eines möglicherweise zu geringen Trennungspotentials des ersten Koordinationstests bei Leistungssportlern um einen weiteren Koordinationstest ergänzt und so auf zehn Tests ausgeweitet. Nachfolgend werden die Testmodalitäten der Einzeltests beschrieben.

12.1.1 Beweglichkeitstest

Test: Sit-and-Reach-Test (SR)

Testinhalt: Rumpfbeweglichkeit und Dehnfähigkeit der Rumpf- und hinteren Beinmuskulatur

Aufgabenstellung: Der Proband sitzt ohne Schuhe mit gestreckten Beinen auf dem Boden und versucht seinen Oberkörper mit gestreckten Armen so weit wie möglich nach vorne in Richtung der Fußspitzen über die Sit-and-Reach-Vorrichtung zu beugen. Die maximale Endposition muss mind. 2 s gehalten werden.

Messung und Wertung: Gemessen wird die Distanz zwischen Fingerspitze und Fußsohlenniveau in Zentimetern. Jeder Proband erhält zwei Versuche, von denen der bessere gewertet wird. Die Leistungsbewertung erfolgt per Normwerttabelle nach den ACSM's Guidelines for Exercise Testing and Prescription (2009) unter Berücksichtigung der Zuordnung vom Fitness and Lifestyle Research Institute in Canada (1983).

Organisation: Vor Beginn wird dem Probanden die Bewegungsaufgabe demonstriert.

Testgeräte: Sit-and-Reach-Box (Maße: s. Anhang C.1), Maßband.

Abbildung 12.1.1 veranschaulicht den Aufbau des Sit-and-Reach-Test.



Abbildung 12.1.1: Start- und Endposition im Sit-and-Reach-Tests (Weiß, 2018).

12.1.2 Reaktionsschnelligkeitstest

Test: Fallstabtest (FT)

Testinhalt: Reaktionszeit auf Bewegung

Aufgabenstellung: Der Proband sitzt bequem neben einem Tisch, auf dem sein geschickterer Arm mit der Kleinfingerseite ruht. Finger und Daumen sind im Winkel von 90° gestreckt. Der Versuchsleiter hält einen 40 cm langen, dünnen Stab senkrecht, ca. 1 cm von der Handinnenseite und vom Daumen des Probanden entfernt. Die Stabunterseite schließt mit der Unterkante der Hand ab. Der Stab wird fallen gelassen und der Proband versucht, den fallenden Stab so schnell wie möglich zu greifen.

Messung und Wertung: Gemessen wird die Entfernung der Stabunterkante von der Unterkante der Hand in Zentimetern. Jeder Proband erhält zwei Versuche, von denen der bessere gewertet wird. Die Leistungsbewertung erfolgt per Normwerttabelle nach Loosch (1999).

Organisation: Vor Beginn der Testung wird dem Probanden der Ablauf demonstriert.

Testgeräte: 40 cm langer Stab mit einem Durchmesser von 2 cm, Maßband, Tisch, Sitzgelegenheit.



Abbildung 12.1.2: Ablauf des Fallstabtests (Müller, 2015).

12.1.3 Koordinationstests

Test: Einbeinstand I (EBSI)

Testinhalt: Großmotorische Koordination der unteren Extremitäten bei statischen Präzisionsaufgaben

Aufgabenstellung: Der Proband steht mit einem Bein 60 s lang auf einer T-Schiene. Das freie Bein darf weder den Boden, die T-Schiene, noch das Standbein berühren.

Messung und Wertung: Jeder Kontakt des freien Beins mit der T-Schiene, dem Standbein oder dem Boden gilt als Fehlerpunkt. Die Leistungsbewertung erfolgt per Normwerttabelle nach Beck & Bös (1995).

Organisation: Jeder Proband erhält zwei Versuche (je einen pro Bein), von denen der bessere gewertet wird. Zwischen den Versuchen ist eine Pause von mind. 1 min einzuhalten.

Testgeräte: Niveaugleiche Ebene, T-Schiene (Maße: s. Anhang C.2), Stoppuhr.

Test: Einbeinstand II (EBSII)

Testinhalt: Großmotorische Koordination der unteren Extremitäten bei statischen Präzisionsaufgaben

Aufgabenstellung: Der Proband steht mit einem Bein so lange wie möglich auf einer T-Schiene. Nach 20 s schließt der Proband seine Augen. Nach weiteren 20 s legt der Proband den Kopf mit geschlossenen Augen in den Nacken. Das freie Bein darf weder den Boden, die T-Schiene, noch das Standbein berühren. Bei Kontakt ist der Versuch beendet.

Messung und Wertung: Standzeit bis zum ersten Kontakt des freien Beines mit dem Boden, der T-Schiene oder dem Standbein in Sekunden.

Organisation: Jeder Proband erhält zwei Versuche (je einen pro Bein), von denen der bessere gewertet wird. Zwischen den Versuchen ist eine Pause von mind. 1 min einzuhalten.

Testgeräte: Niveaugleiche Ebene, T-Schiene, Stoppuhr.

Abbildung 12.1.3 veranschaulicht den Aufbau der beiden Einbeinstandtests.



Abbildung 12.1.3: Grundposition der Einbeinstandtests (Weiß, 2018).

12.1.4 Agilitätstest

Test: Change-of-Direction-Speed-Test (CDS)

Testinhalt: Agilität bei offener Gestaltungsmöglichkeit

Aufgabenstellung: Der Proband durchläuft von einer Startlinie aus so schnell wie möglich einen vorgegebenen Parcours, der durch große und kleine Hütchen markiert ist. Dabei gilt es, die kleineren Hütchen mit einer Hand zu berühren, die großen Hütchen müssen lediglich umlaufen werden. Der Test endet mit Überqueren der Ziellinie (Wilkinson, et al., 2012).

Messung und Wertung: Gemessen wird die für das Durchlaufen des Parcours benötigte Zeit. Jeder Proband erhält zwei Versuche, von denen der bessere gewertet wird.

Organisation: Vor Beginn der Testung wird dem Probanden der Verlauf des Parcours die Wege abgehend demonstriert. Es werden jedoch keine Hinweise zu effektiven Lauftechniken gegeben. Zwischen den beiden Versuchen ist auf eine vollständige Erholung des Probanden zu achten. Es wird eine Pausenzeit von mind. 2 min veranschlagt.

Testgeräte: Niveaugleiche Ebene, Klebeband (Start-, Ziellinie), 7 große (Höhe: 30 cm) und 8 kleine Hütchen (Höhe: 5 cm), Stoppuhr.

Abbildung 12.1.4 veranschaulicht den Aufbau des Agilitätstests Squash.

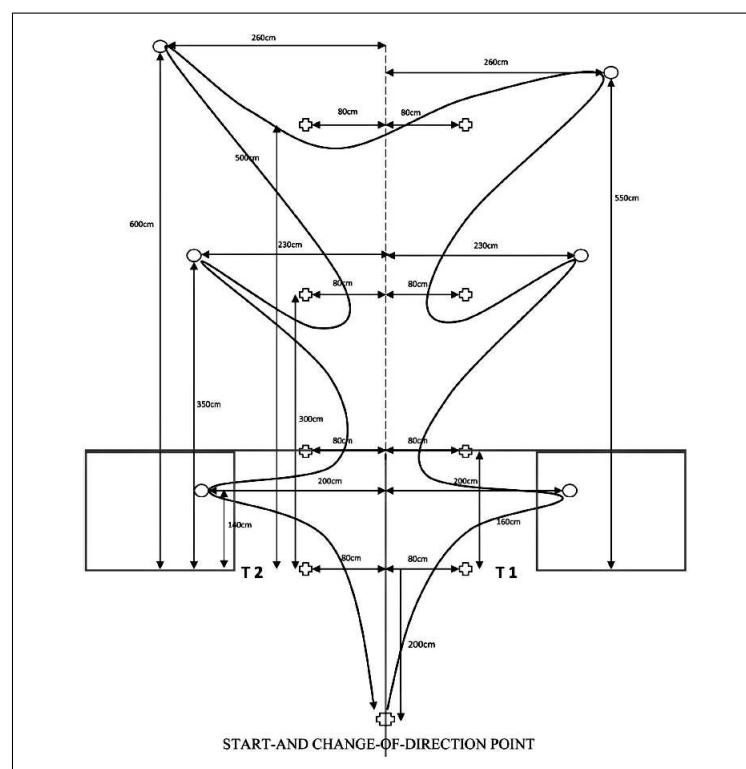


Abbildung 12.1.4: Aufbau des Change-of-Direction-Speed-Tests nach Wilkinson (Wilkinson et al., 2012, S. 543): die Kreise symbolisieren kleine, die Kreuze große Hütchen.

12.1.5 Schnelligkeitstest

Test: 30 m-Sprinttest (Sprint)

Testinhalt: Antrittsschnelligkeit, Beschleunigungsfähigkeit und Grundschnelligkeit

Aufgabenstellung: Der Proband sprintet eigeninitiativ 30 m aus dem Hochstart von einer 1 m vor der ersten Lichtschranke postierten Startlinie.

Messung und Wertung: Messung der Teilzeiten nach 5, 10, 20 und 30 m (Reilly et al., 2000). Jeder Proband erhält zwei Versuche, von denen der bessere gewertet wird.

Organisation: Zwischen den beiden Versuchen ist auf eine vollständige Erholung des Probanden zu achten. Es wird eine Pausenzeit von mind. 3 min veranschlagt. Es ist für ausreichend Auslauf zu sorgen. Die Leistungsbewertung erfolgt per Normwerttabelle nach Davis (2000).

Testgeräte: Niveaugleiche Ebene, Klebeband (Start- und Zielmarkierungen), Lichtschrankensystem mit vier Lichtschranken, Maßband.

Abbildung 12.1.5 veranschaulicht den Aufbau des 30 m-Sprinttests.

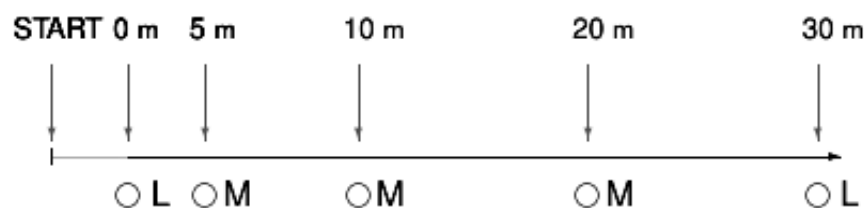


Abbildung 12.1.5: Aufbau des 30 m-Sprinttests (L=Lichtschranke, M=visuelle Marker).

12.1.6 Krafttests

Test: Jump-and-Reach-Test (JR)

Testinhalt: Bilaterale Schnellkraft der unteren Extremitäten

Aufgabenstellung: Der Proband tritt vorlings an eine Wand, streckt die Hände in die Hochhalte und markiert mit den Spitzen der Mittelfinger in Schulterbreite die Reichhöhe. Die beiden Markierungen sollen dabei auf gleicher Höhe liegen. Anschließend tritt der Proband ca. 20 bis 30 cm von der Wand zurück, stellt sich seitlich zu ihr, springt beidbeinig nach beliebiger Aushöhlbewegung vom Boden ab und tippt mit der Spitze des Mittelfingers der nahe zur Wand gelegenen Hand möglichst hoch an die Wand. Um die jeweiligen Berührungspunkte zu markieren, werden die Finger mit Kreide bestrichen.

Messung und Wertung: Die Differenz der beiden Markierungshöhen in Zentimetern bildet die Messgröße. Jeder Proband hat zwei Versuche, von denen der

bessere Versuch gewertet wird. Die Leistungsbewertung erfolgt per Normwert-tabelle nach Beck & Bös (1995).

Organisation: Zu Beginn der Testung wird dem Probanden der Jump-and-Reach demonstriert und dabei auf die positive Wirkung des Armschwungs hingewiesen.

Testgeräte: Wand, Maßband, Magnesia.

Abbildung 12.1.16 veranschaulicht den Ablauf des Jump-and-Reach-Tests.

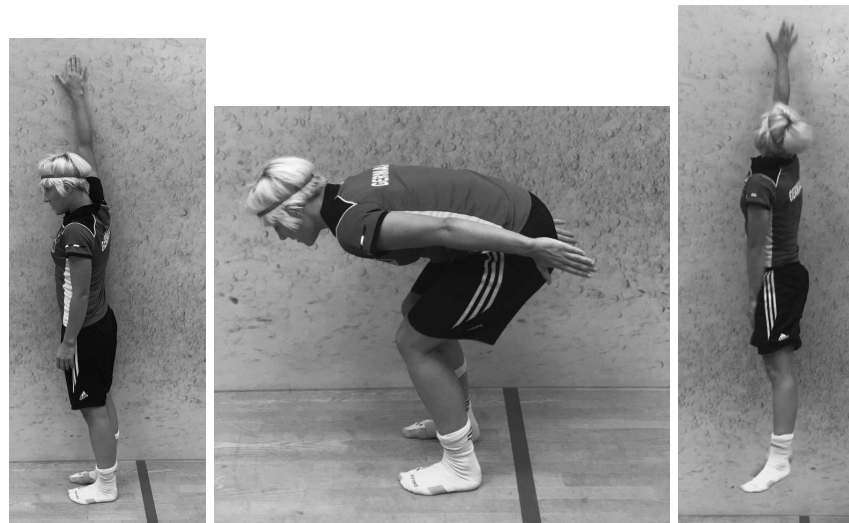


Abbildung 12.1.6: Ablauf des Jump-and-Reach-Test (Weiß, 2018).

Test: Medizinballstoß mit fixiertem Rumpf (MS)

Testinhalt: Bilaterale Schnellkraft der oberen Extremitäten

Aufgabenstellung: Der Proband sitzt erhöht mit dem Rücken zur Wand und berührt diese mit geradem Rücken. Der Medizinball wird mit beiden Händen umfasst, vor die Brust gehalten und mit einem Druckpassstoß so weit wie möglich nach vorn gestoßen. Der Rücken darf dabei den Wandkontakt nicht verlieren.

Messung und Wertung: Gemessen wird die Stoßweite in Zentimetern von der Wand bis zum Landepunkt des Balls. Jeder Proband erhält zwei Versuche, von denen der bessere gewertet wird.

Testgeräte: Niveaugleiche Ebene, Medizinball (3 kg), Sitzgelegenheit, Wand, Maßband.

Abbildung 12.1.7 veranschaulicht den Ablauf des Medizinballstoßens.



Abbildung 12.1.7: Stoßposition beim Medizinballstoßen (Müller, 2015).

Test: Standweitsprung (STJ)

Testinhalt: Bilaterale Schnellkraft der unteren Extremitäten

Aufgabenstellung: Der Proband versucht von einer markierten Absprunglinie aus mit unmittelbar an der Absprunglinie positionierten Füßen durch beidbeinigen Absprung möglichst weit nach vorne zu springen. Die Landung erfolgt ebenfalls beidbeinig auf einer zur Absprunglinie niveaugleichen Ebene. Der absprungliniennächste Landepunkt wird markiert.

Messung und Wertung: Gemessen wird die Differenz zwischen Absprunglinie und Landepunkt in Zentimetern. Ein Zurückgreifen mit den Armen während der Landung oder ein Nach-vorne-fallen-lassen ist nicht zulässig. In diesen Fällen ist jedoch ein erneuter Versuch erlaubt. Jeder Proband erhält zwei Versuche, von denen der bessere gewertet wird. Die Leistungsbewertung erfolgt per Normwerttabelle nach Beck & Bös (1995).

Organisation: Zu Beginn der Testung wird dem Probanden der Standweitsprung demonstriert und dabei auf die positive Wirkung des Armschwungs hingewiesen.

Testgeräte: Niveaugleiche Ebene, Maßband, Magnesia.

Abbildung 12.1.18 veranschaulicht den Ablauf des Standweitsprungs.



Abbildung 12.1.8: Ablauf des Standweitsprungs von rechts nach links (Weiß, 2018).

12.1.7 Ausdauerleistungstest

Test: 20 m-Shuttle-Run-Test (MSR)

Testinhalt: Aerobe Ausdauerleistungsfähigkeit

Aufgabenstellung: Der Proband steht im Hochstart an der markierten Startlinie. Auf ein akustisches Signal beginnt der Proband zunächst im Gehen. Bewältigt werden muss eine durch zwei Linien markierte Strecke von 20 m. Die Laufgeschwindigkeit wird dabei über den Abstand der akustischen Signale bestimmt. Der Proband soll sich dabei immer so schnell fortbewegen, dass er mit Ertönen des Signals jeweils das Streckenende erreicht. Eine Genauigkeit von ± 1 bis 2 m ist ausreichend. In Folge einer stetigen Verkürzung der zeitlichen Abstände der akustischen Signale kommt es somit zu einer progressiven Geschwindigkeitssteigerung. Der Test ist beendet, wenn es dem Probanden dreimal hintereinander nicht möglich ist, die 20 m-Strecke in der durch das akustische Signal vorgegebenen Geschwindigkeit zurückzulegen (Abstand > 2 m) (Bös & Beck, 1995).

Messung und Wertung: Gemessen wird die Anzahl vollständig absolvierter Bahnen. Die Ableitung der der Anzahl der Bahnen entsprechenden Sauerstoffaufnahme erfolgt auf Basis der Untersuchungsergebnisse von Paradisis et al. (2014). Die Leistungsbeurteilung erfolgt per Normwerttabelle nach den ACSM's Guidelines for Exercise Testing and Prescription (2009).

Organisation: Der 20 m-Shuttle-Run-Test bildet den Abschluss der Testbatterie. Er kann von bis zu 20 Probanden gleichzeitig ausgeführt werden. Ein spezielles Aufwärmen vor dem Test ist nicht zusätzlich erforderlich.

Testgeräte: Niveaugleiche Fläche, Klebeband (Streckenmarkierung), Shuttle-Run-Tonspur mit akustischen Signalen, Player.

Abbildung 12.1.9 veranschaulicht den Aufbau des 20 m-Shuttle-Run-Tests.

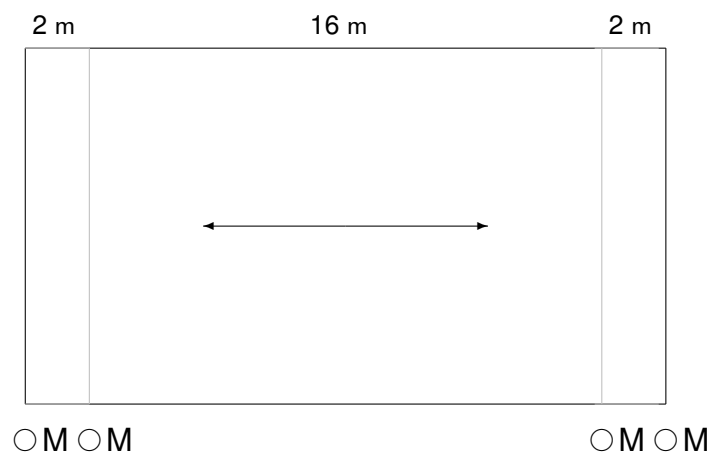


Abbildung 12.1.9: Aufbau des 20 m-Shuttle-Run-Tests (M=visuelle Marker).

13 Datenverarbeitung und Statistik

13.1 Datenverarbeitung

Im Vorfeld der Datenauswertung wurden alle Spiele per Videoanalyse auf außerordentliche Störungen analysiert, die zu überproportional langen Spielunterbrechungen führten. Diese wurden als Ausreißer definiert und inklusive der vorangehenden Ballwechsel aus den Datensätzen entfernt. Da diese Störungen mit einem Let gewertet wurden, blieb das Spielergebnis dadurch unbeeinflusst.

Die während der Hauptuntersuchung erhobenen Rohdaten wurden nach Ende des jeweiligen Tests aus den Geräten ausgelesen, gespeichert und anschließend mit IBM SPSS Statistics, Version 21, bearbeitet und analysiert. Die Interpolation der Daten erfolgte darüber hinaus zum Teil mit Matlab, Version R2013a. Vor der Analyse der physiologischen Daten der Laufbandspiroergometrie bzw. On-Court-Spiroergometrie wurden Fehl- und Doppelmessungen aus den Messprotokollen entfernt. Anschließend erfolgte die Auswertung unter Berücksichtigung aller zu realen Messzeitpunkten korrespondierenden Messwerte. Dabei lagen die spiroergometrischen Messwerte ($\dot{V}T$, $\dot{V}E$, $\dot{V}O_2$, $\dot{V}CO_2$, RER) pro Atemzug und der kardiale Messwert (HR) sekundlich vor.

Die innerhalb der Laufbandspiroergometrie maximal erreichte Geschwindigkeit sowie die Endstufe wurden über die Belastungsdauer anteilig berechnet. Dabei erfolgte eine Rundung auf die nächste Viertelstufe. Die Bestimmung der auf Atemgasparametern beruhenden Maximalwerte erfolgte durch Identifizierung des größten arithmetischen Mittels über die zu 15 hintereinander folgenden Atemzügen korrespondierenden Messwerte. Dabei wurde lediglich die letzte Minute einer Stufe betrachtet. Die Bestimmung von Geschwindigkeit, Herzfrequenz und Sauerstoffaufnahme der Probanden an den Laktatschwellen erfolgte anhand der Laktatleistungskurve, welche per Splineinterpolation der den Stufenenden zuzuordnenden Blutlaktatkonzentration über den Belastungszeitraum modelliert wurde. Zur Approximation der Leistungsfähigkeit der Probanden an den Laktatschwellen wurden die maximale Sauerstoffaufnahme und Herzfrequenz einer jeden Belastungsstufe bestimmt und anschließend ebenfalls über den Belastungszeitraum interpoliert. Anschließend wurden die interpolierte Sauerstoffaufnahme und Herzfrequenz mit der Laktatleistungskurve synchronisiert und die Schwellenwerte identifiziert.

Um innerhalb der physiologischen Messdaten der On-Court-Spiroergometrie den Belastungszeitraum eindeutig zu identifizieren, wurde der Start eines Satzes durch den (streng) monotonen, deutlich sichtbaren Anstieg von Sauerstoffaufnahme, Atemfre-

quenz und Herzfrequenz nach der Spielvorbereitung bzw. jeder Satzpause definiert. Das Satzende wurde als letzter Wert vor (streng) monotoner Abnahme selbiger Parameter über mehr als 30 s festgelegt. Als Orientierungshilfe dienten dabei Markierungen im spiroergometrischen Messprotokoll, welche während der Testung zu Beginn jeder neuen Phase gesetzt wurden. Eine vergleichbare Phasenidentifizierung wurde auch verwendet, um die Ballwechsel sowie die nachfolgende Pause bei außerordentlichen Spielunterbrechungen innerhalb der physiologischen Messdaten möglichst exakt zu lokalisieren, für welche ebenfalls unmittelbar nach Beginn und am Ende jeder Spielunterbrechung Markierungen im spiroergometrischen Messprotokoll gesetzt wurden. Die Bestimmung der höchsten Sauerstoffaufnahme im Spiel ($\dot{V}O_{2\text{peak}}$) erfolgte als arithmetischen Mittels über 5 Atemzüge um den höchsten gemessenen Wert, wobei lediglich die Sauerstoffaufnahme in den Sätzen berücksichtigt wurde.

Um die Parameter der Modellfunktionen der EPOC nach Ende des Spiels aus den Daten bestmöglich zu schätzen, wurden die Messwerte der Sauerstoffaufnahme der Nachbelastung zunächst geglättet und anschließend die Datenpunktwolke per Methode der kleinsten Quadrate innerhalb einer nichtlinearen Regression in SPSS analysiert. Die Startwerte hierfür wurden den Erholungszeiten der energieliefernden Teilsysteme sowie der Ruhesauerstoffaufnahme nach de Marées (2003) entsprechend gewählt. Um eine potentielle Verzögerung des Beginns der Nachatmung durch etwaige Aktivitäten zu berücksichtigen, wurde zusätzlich ein Timedelay ($0 \leq TD \leq t_2$) in die Modellfunktion integriert:

$$f(t) = a \cdot e^{\frac{-t+TD}{\tau_a}} + b \cdot e^{\frac{-t+TD}{\tau_b}} + c. \quad (13.1.1)$$

Die Amplituden der schnellen bzw. langsamen Komponente der Nachatmung in den Satzpausen wurden nach Datenglättung per nichtlinearer Regression mit der Modellfunktion (13.1.1) für den Zeitraum von Beginn der Satzpause bis zum Beginn des Warmspiels bestimmt. Die Zeitkonstanten der schnellen und langsamen Komponente wurden dabei aus dem individuellen Modell der EPOC nach Spielende fixiert. Dies beruht auf der Annahme, dass sich die Zeitkonstanten der schnellen und langsamen Komponente in Abhängigkeit des individuellen Trainingszustandes als belastungsunabhängige Parameter ergeben, wohingegen die Amplituden aus der aktuellen Beanspruchung unmittelbar vor Belastungsende bzw. -pause resultieren. Im Falle eines positiven, inhaltlich plausiblen Timedelays wurde dieses innerhalb der Berechnungsmethodik von den Integralgrenzen subtrahiert.

Die zum Teil unterschiedliche Anzahl der Sätze innerhalb einer Begegnung wurde für eine bessere Vergleichbarkeit der Datensätze sowie zur Analyse von Veränderungen im Spielverlauf auf drei Sätze pro Spiel genormt. Hierzu wurden bei zwei

Fünfsatzspielen und einem Viersatzspiel die Durchschnittswerte der mittleren Sätze gemittelt und so zu einem Satz (Satz 2) zusammengefasst. Die Stärke der sich dadurch ergebenden Datenverzerrung wurde statistisch überprüft.

Zur Überprüfung der Reliabilität des Belastungsprofils wurde für jeden Analyseblock stichprobenhaft je ein Proband Squash national und Squash regional fünfmal analysiert und der Variabilitätskoeffizient (VK) sowie die Intra-Re-Test-Reliabilität bestimmt.

13.2 Statistik

Für die deskriptive Statistik wurden die Lagemaße arithmetisches Mittel und Median sowie die dazugehörigen Streuungsmaße Standardabweichung und Interquartilabstand berechnet. Sämtliche Stichproben wurden visuell (Histogramm, QQ-Plot) und mittels statistischem Test (Shapiro & Wilk, 1965, Razali & Wah, 2011) auf Normalverteilung überprüft. Für Stichproben mit signifikanter Abweichung von der Normalverteilung wurden in der weiteren Analyse nicht-parametrische Tests verwendet.

Unterschiede zwischen den Variablen im Spielverlauf wurden bei normalverteilten Stichproben nach Test der Sphärizität per Mauchly-Test und Korrektur der Freiheitsgrade bei Verletzung in Abhängigkeit des Ausmaßes dieser per Greenhouse-Geisser-Korrektur ($\epsilon \leq 0,75$) bzw. Huynh-Feldt-Korrektur ($\epsilon > 0,75$) (Girden, 2012) mittels Repeated-measurement-ANOVA mit den einzelnen Sätzen als Innersubjektfaktor und dem Spielniveau sowie der Unterscheidung zwischen Gewinnern und Verlierern als Zwischensubjektfaktoren untersucht. Nicht signifikante Interaktionseffekte wurden visuell (Streudiagramm) überprüft und bei Auffälligkeiten per Post-Hoc- t -Tests abgesichert. Bei nicht normalverteilten Stichproben wurde alternativ der Friedman-Test für k verbundene Stichproben verwendet. Zur Vermeidung von α -Inflation wurde bei multiplen Tests das α -Niveau mittels Bonferroni-Methode (parametrisch) bzw. Dunn-Bonferroni-Korrektur (nicht-parametrisch) adjustiert. Bei signifikanten Zwischensubjekteffekten wurde eine Post-Hoc-Analyse durchgeführt.

Mittelwertunterschiede zwischen zwei unabhängigen Stichproben wurden per t -Tests für unabhängige Stichproben (parametrisch) bzw. per Mann-Whitney-U-Test (nicht-parametrisch) untersucht. Bei normalverteilten Stichproben wurde die Varianzhomogenität per Levens-Test überprüft. Mittelwertunterschiede zwischen zwei abhängigen Stichproben wurden per t -Tests für abhängige Stichproben (parametrisch) bzw. per Wilcoxon-Test (nicht-parametrisch) analysiert. Im Fall der Anwendung des nicht-parametrischen Tests wurde bei deskriptiver Darstellung der Ergebnisse zusätzlich zum Mittelwert mit Standardabweichung der Median mit Interquartilabstand angegeben.

Zusammenhänge zwischen den erhobenen Daten wurden bei Normalverteilung per bivariater Korrelationsanalyse nach Pearson und unter Berücksichtigung potentieller Einflussgrößen per partieller Korrelation untersucht. Im Falle nicht normalverteilter Stichproben wurde alternativ eine Spearman-Korrelationsanalyse durchgeführt. Zur Konkretisierung linearer Zusammenhänge zwischen zwei Variablen wurden lineare Regressionen und zur Identifikation von Haupteinflüssen auf eine abhängige Variable multiple Regressionen unter Kontrolle von Multikollinearität und Autokorrelation durchgeführt.

Zur Bewertung der Effektgröße wurde testabhängig die Effektstärke per Cohens d mit gepoolter Standardabweichung ($d := |d|$, $|d| \geq 0,2$: klein, $|d| \geq 0,5$: mittel, $|d| \geq 0,8$ groß), per Korrelationskoeffizient r ($r \geq 0,1$: klein, $r \geq 0,3$: mittel, $r \geq 0,5$ groß) und per partiellem Eta-Quadrat ($\eta_p^2 \geq 0,01$: klein, $\eta_p^2 \geq 0,06$: mittel, $\eta_p^2 \geq 0,14$ groß) untersucht (Seifert, 2008). Im Falle nicht signifikanter Effekte inhaltlich relevanter Stärke wurde eine Post-Hoc-G*Poweranalyse zur Berechnung der empirischen Teststärke durchgeführt.

Für alle Tests wurde ein Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$ festgelegt. Darauf basierend wurde eine Differenzierung in statistisch nicht signifikante ($p > 0,05$), statistisch signifikante ($p \leq 0,05$), statistisch hoch signifikante ($p \leq 0,01$) und statistisch höchst signifikante Ergebnisse ($p \leq 0,001$) vorgenommen. Statistisch marginal signifikante Ergebnisse ($p < 0,1$) wurden für $0,05 < p < 0,1$ als statistische Trends eingestuft. Innerhalb von Diagrammen wurden statistisch signifikante Zwischensubjekteffekte mit *, statistisch hoch signifikante Unterschiede durch ** und statistisch höchst signifikante Ergebnisse durch *** gekennzeichnet. In Tabellen und Diagrammen wurden statistisch signifikante Unterschiede zwischen Satz 1 und Satz 2 mit †, statistisch signifikante Unterschiede zwischen Satz 2 und Satz 3 mit ‡ und statistisch signifikante Unterschiede zwischen Satz 1 und Satz 3 mit § markiert.

Die Formulierung „nicht signifikant“ wird im Falle statistisch nicht signifikanter und inhaltlich nicht relevanter Effekte verwendet. Leichte Effekte wurden alternativ als wahrnehmbar, mittlere Effekte als deutlich und starke Effekte als erheblich oder massiv bezeichnet.

Teil III

Ergebnisse

14 Anamnese

14.1 Anthropometrie Squash

Bei Vergleich der anthropometrischen Daten der Haupt- und Nebenuntersuchung konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden. Tabelle 14.1 enthält die deskriptive Statistik der Anthropometrie der Haupt- und Nebenuntersuchung sowie die wesentlichen Kennzahlen der Interferenzstatistik.

Tabelle 14.1: Darstellung und Vergleich von Alter, Körpergröße, Gewicht, BMI und Armspanne der Probanden der Haupt- (HU) und der Nebenuntersuchung (NU).

Variable	HU ($n = 22$)		NU ($m = 21$)		t-Test/U-Test		
	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>t/z</i>	<i>df/U</i>	<i>p</i>
Alter [Jahre]	34,23 (33,00)	15,34 (30)	33,33 (27,00)	13,85 (16)	- ,012	- 230,50	- ,990
Körpergröße [cm]	182,93	6,66	182,07	6,69	,423	41	,675
Gewicht [kg]	78,94	6,51	79,69	6,72	-,371	41	,712
BMI	23,67 (22,75)	2,67 (3)	24,20 (23,96)	2,50 (3)	- ,839	- 265,50	- ,402
Armspanne [cm]	182,80	7,54	181,93	9,06	,351	41	,727

Zum Untersuchungszeitpunkt waren alle Probanden anamnetisch und klinisch gesund und voll belastbar und nahmen darüber hinaus keine pharmakologischen Substanzen ein. Das Trainingspensum der Probanden der Haupt- und Nebenuntersuchung sowie die Anzahl der Jahre, die die jeweiligen Probanden im Mittel Squash als Wettkampfsportart betrieben sind in Abbildung 14.1.1 visualisiert.

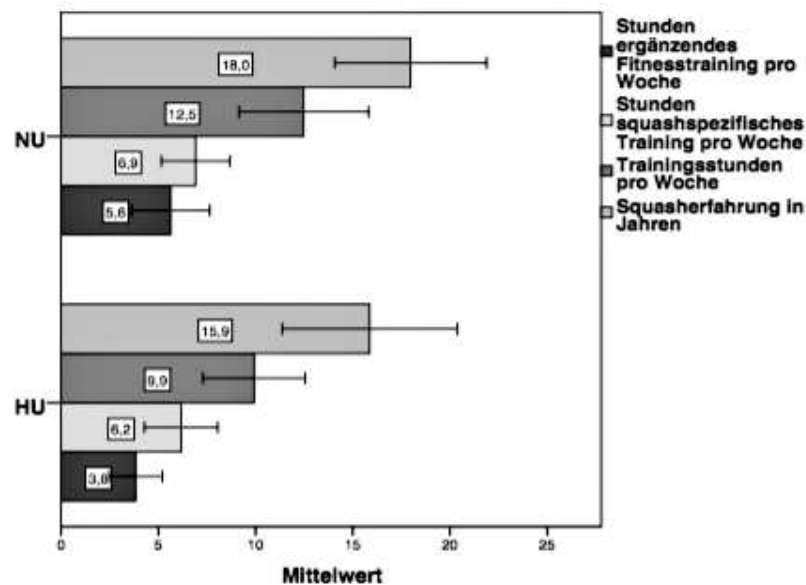


Abbildung 14.1.1: Squascherfahrung und Trainingspensum der Probanden der Haupt- (HU) und Nebenuntersuchung (NU).

Auch diesbezüglich konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Stichproben festgestellt werden.

14.1.1 Anthropometrie in Abhängigkeit des Spielniveaus

Ein Vergleich der anthropometrischen Daten Squash national und Squash regional zeigte innerhalb der Stichprobe der Hauptuntersuchung einen statistisch hoch signifikanten starken Unterschied hinsichtlich des Alters der Probanden. So waren die Spieler Squash national mit einem durchschnittlichen Altersunterschied von mehr als 20 Jahren erheblich jünger als die Spieler Squash regional ($d = 1,829$). Darüber hinaus waren die Probanden Squash national mit einem Mittelwertunterschied von 5,42 kg erheblich leichter als die Probanden Squash regional ($d = 0,930$). Dieser Unterschied war jedoch statistisch lediglich marginal signifikant. Bei Betrachtung der Relation von Körpergröße und Gewicht in Form des BMI konnte mit einer Mittelwertdifferenz von $-1,44$ ein statistisch nicht signifikanter mittlerer Effekt festgestellt werden ($d = 0,545$). Die deskriptive Statistik der Anthropometrie Squash in Abhängigkeit des Spielniveaus sowie die wesentlichen Kennzahlen der Interferenzstatistik sind in Tabelle 14.2 enthalten.

Tabelle 14.2: Darstellung und Vergleich von Alter, Körpergröße, Gewicht, BMI und Armspanne Squash national und Squash regional (HU).

Variable	Squash national ($n = 12$)		Squash regional ($m = 10$)		t-Test/U-Test		
	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>t/z</i>	<i>df/U</i>	<i>p</i>
Alter [Jahre]	24,50 (18,50)	10,98 (8)	45,90 (44,50)	11,15 (20)	- 3,177	- 108	- ,001
Körpergröße	182,29	6,13	183,70	7,50	-,485	20	,633
Gewicht [kg]	76,48 (77,15)	6,76 (11,9)	81,90 (83,65)	5,04 (6,6)	- 1,978	- 90	- ,050
BMI	23,02	1,90	24,46	3,32	-1,274	20	,217
Armspanne	183,71	6,28	181,70	9,06	,613	20	,547

Innerhalb der Stichprobe der Hauptuntersuchung war die Anzahl der Trainingsstunden pro Woche Squash national ($12,64 \pm 5,94$ h) statistisch hoch signifikant erheblich höher als Squash regional ($6,19 \pm 2,60$ h, $t(14,500) = 3,207$, $p = 0,006$, $d = 1,373$). Dabei konnte insbesondere eine signifikant erheblich höhere Anzahl squashspezifischer Trainingsstunden Squash national ($8,00 \pm 3,66$ h zu $3,65 \pm 2,29$ h) festgestellt werden ($t(15,959) = 2,870$, $p = 0,011$, $d = 1,229$).

Für die Stichprobe der Nebenuntersuchung konnte ebenfalls ein hoch signifikant und stark höheres Alter der Probanden Squash regional festgestellt werden ($25,50 \pm 4,0$ Jahre zu $45,22 \pm 12,9$ Jahre, $U = 98$, $p = 0,000$, $d = 2,117$). Auch zeigte sich hier ein vergleichbarer mittlerer, wenn auch statistisch nicht signifikanter Unterschied bezüglich des BMIs ($23,52 \pm 1,58$ zu $25,04 \pm 7,0$, $t(19) = -1,385$, $p = 0,182$, $d = 0,558$). Hinsichtlich des wöchentlichen Trainingspensums sowie der Inhalte des Trainings zeigten sich ebenfalls starke systematische Unterschiede. So überstieg das wöchentliche Trainingspensum der Probanden der Nebenuntersuchung Squash national mit $16,67 \pm 6,62$ h pro Woche das der Probanden Squash regional ($6,19 \pm 2,60$) erheblich ($d = 1,902$) und statistisch hoch signifikant ($t(15,355) = 4,943$, $p = 0,001$). Hierbei zeigte sich sowohl ein massiv höheres squashspezifisches Trainingspensum der Probanden Squash national ($9,08 \pm 3,23$ h zu $3,66 \pm 2,28$, $t(19) = 4,098$, $p = 0,001$, $d = 1,841$) als auch eine erheblich höhere Anzahl der Stunden Fitnesstraining pro Woche ($7,71 \pm 4,51$ h zu $2,52 \pm 2,14$ h, $t(19) = 3,006$, $p = 0,008$, $d = 1,351$).

Für die international agierenden Spieler beider Untersuchungspole ($n = 3$) konnte ein Trainingspensum von insgesamt $24,33 \pm 3,51$ h pro Woche registriert werden, wobei $12,00 \pm 1,00$ h squashspezifisch trainiert und $12,83 \pm 3,82$ h mit allgemeinem Fitnesstraining verbracht wurden. Der BMI dieser Spieler lag im Mittel bei $24,42 \pm 4,93$.

14.1.2 Anthropometrie von Gewinnern und Verlierern

Ein Vergleich der Anthropometrie von Gewinnern und Verlierern innerhalb der Stichprobe der Hauptuntersuchung zeigte bei Betrachtung aller Probanden keine signifikanten Mittelwertunterschiede.

Bei separater Untersuchung der Spielniveaus konnte Squash regional ($n = m = 5$) ein starker systematischer Unterschied hinsichtlich des Körpergewichts festgestellt werden ($t(8) = 2,357$, $p = 0,046$). Somit waren die Gewinner ($84,96 \pm 3,18$ kg) mit ~ 6 kg mehr deutlich schwerer als die Verlierer ($78,84 \pm 4,86$ kg, $d = 1,491$). Dieser Unterschied verlor jedoch durch zusätzliche Berücksichtigung der Körpergröße im BMI seine statistische Signifikanz ($t(8) = 2,074$, $p = 0,072$). Dennoch war auch hier trotz lediglich marginaler Signifikanz der BMI von Gewinnern ($26,32 \pm 3,44$) im Vergleich zu dem von Verlierern ($22,60 \pm 2,07$) deutlich höher ($d = 1,312$). Darüber hinaus konnte Squash regional trotz fehlender Signifikanz ein mit durchschnittlich 5,54 Jahren mehr merklich höheres Alter seitens der Gewinner ($48,40 \pm 10,43$ Jahre) festgestellt werden ($d = 0,435$).

Die höhere Squasherfahrung der Gewinner Squash regional ($22 \pm 6,06$ Jahre zu $16,75 \pm 13,60$ Jahre, $d = 0,443$) war statistisch nicht signifikant ($t(4,145) = 0,705$, $p = 0,518$).

14.1.3 Korrelationen Anthropometrie

Insgesamt konnte eine statistisch höchst signifikante starke positive Korrelation von Alter und Squasherfahrung in Jahren ($r = 0,777$, $p = 0,000$) sowie statistisch signifikante deutliche positive Korrelation von Alter und BMI festgestellt werden ($r = 0,474$, $p = 0,026$).

Nachfolgend werden zunächst die Ergebnisse der Hauptuntersuchung in folgender Reihenfolge dargestellt: Belastung (Ergebnisse der Videoanalyse), Beanspruchung, Energiebereitstellung (Ergebnisse der On-Court-Spiroergometrie) und aerobe Leistungsfähigkeit (Ergebnisse der Laufbandspiroergometrie). Insgesamt wurden nach der Entfernung von 16 Ballwechseln Squash national und 2 Ballwechseln Squash regional 367 Ballwechsel Squash national und 355 Ballwechsel Squash regional in 20 bzw. 18 Sätzen und 6 bzw. 5 Spielen analysiert. Innerhalb von 11 Spielen in 38 Sätzen gespielte 722 Ballwechsel stellten somit die Analysegrundlage von Belastung, Beanspruchung und Energiebereitstellung im Squash dar. In Kapitel 17.2 folgt die Ergebnispräsentation der Nebenuntersuchung. In Kapitel 18 werden sowohl Ergebnisse der Haupt- als auch der Nebenuntersuchung präsentiert, wobei jedoch die jeweilige Bezugstichprobe ausgewiesen wird.

15 Belastung im Squash

15.1 Zeitliche Belastungsstruktur Squash

Die Häufigkeitsverteilung mit entsprechender Perzentilzerlegung der Anzahl der Schläge pro Ballwechsel, der durchschnittlichen Dauer der Ballwechsel sowie der durchschnittlichen Dauer der Pause zwischen den einzelnen Ballwechseln sind in Tabelle 15.1 aufgeführt.

Tabelle 15.1: Darstellung der Häufigkeitsverteilung der primären Belastungsgrößen.

Variable	n	Min	Max	Perzentile				
				10	25	50	75	90
S	722	1,00	55,00	2,00	3,00	6,00	10,00	17,70
DR [s]	722	1,54	75,50	3,09	5,00	8,76	15,35	25,00
RT [s]	684	3,20	34,10	5,60	6,97	9,18	11,44	13,89

Anzahl der Schläge pro Ballwechsel (S), Dauer der Ballwechsel (DR), Pause zwischen den Ballwechseln (RT).

Abbildung 15.1.1 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Länge der Ballwechsel.

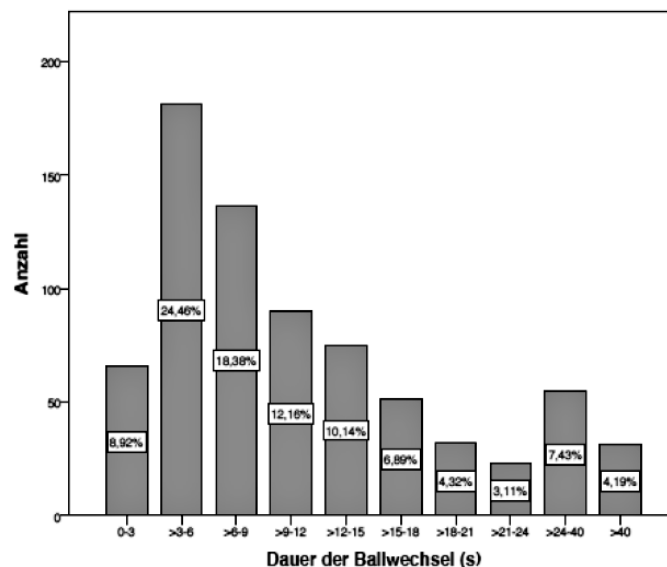


Abbildung 15.1.1: Häufigkeitsverteilung der Dauer der Ballwechsel.

Bei Differenzierung aller Ballwechsel in sehr kurze Ballwechsel (< 4 s), kurze Ballwechsel (4 bis < 12 s), mittlere Ballwechsel (12 bis < 25 s) und lange Ballwechsel (> 25 s) ergab sich die in Abbildung 15.1.2 dargestellte Verteilung.

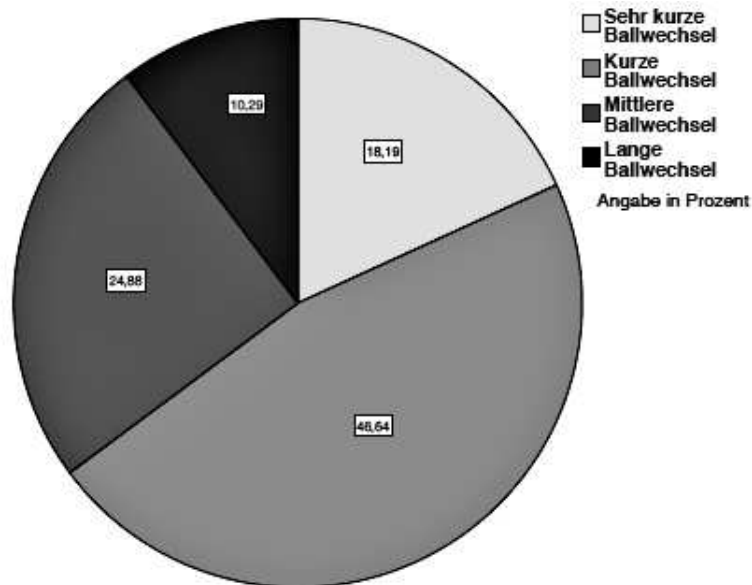


Abbildung 15.1.2: Prozentuale Anteile sehr kurzer, kurzer, mittlerer und langer Ballwechsel.

In ~ 16 % der Ballwechsel wurden maximal 3 Schläge ausgeführt. In ~ 62 % der Ballwechsel konnten zwischen 4 und 12, in ~ 17 % zwischen 13 und 24 und lediglich in ~ 5 % mehr als 25 Schläge beobachtet werden. Die Häufigkeitsverteilung der pro Ballwechsel ausgeführten Schläge ist in Abbildung 15.1.3 visualisiert.

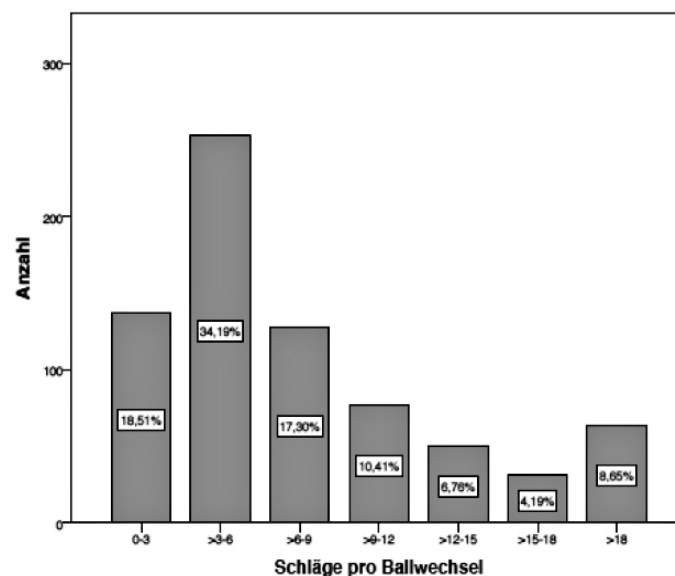


Abbildung 15.1.3: Häufigkeitsverteilung der Anzahl der Schläge pro Ballwechsel.

Die Pausenzeit zwischen den Ballwechseln konnte in $\sim 1\%$ der Fälle als sehr kurz, in $\sim 79\%$ als kurz, $\sim 19\%$ als mittel und in $\sim 1\%$ als lang eingestuft werden. Lange Pausen waren dabei Folge von Zeitspiel, Unkonzentriertheit oder offener Schuhe. Die Häufigkeitsverteilung der Länge der Pausen zwischen den Ballwechseln ist in Abbildung 15.1.4 veranschaulicht.

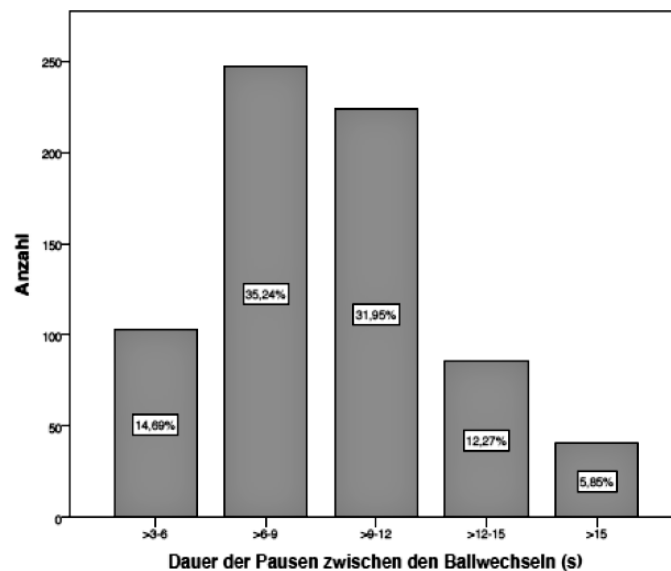


Abbildung 15.1.4: Häufigkeitsverteilung der Dauer der Pausen zwischen den Ballwechseln.

Insgesamt wurden pro Spiel durchschnittlich $53,73 \pm 5,33$ Punkte in $57,27 \pm 4,84$ Ballwechseln ausgespielt. Inklusive der Satzpausen ergab sich eine durchschnittliche Gesamtspielzeit von $1427 \pm 302,91$ s. Nach Ausschluss der Satzpausen betrug die durchschnittliche Netto-Gesamtspielzeit $1212,56 \pm 296,17$ s. Tabelle 15.4 enthält die deskriptive Statistik zur zeitlichen Belastungsstruktur pro Satz.

Tabelle 15.2: Zeitliche Belastungsstruktur pro Satz.

Variable	<i>n</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	Min	Max
R	11	19,09	1,61	17,33	22,33
P	11	17,81	2,08	15,33	21,55
S	11	8,35	2,94	4,25	14,25
DR [s]	11	11,88	4,25	6,21	20,33
RT [s]	11	9,61	1,06	8,13	11,32
ERR	11	1,24	0,41	0,68	1,84
RPT [s]	11	228,95	82,67	111,36	351,36
TPT [s]	11	404,19	98,72	265,40	573,05
EPT [%]	11	55,04	8,59	41,71	65,82
TS	11	160,53	56,56	76,33	245,00
SF _{RPT} [spm]	11	42,30	1,49	39,52	44,22
SF _{TPT} [spm]	11	23,24	3,60	17,27	27,65

Anzahl gespielter Ballwechsel (R), Anzahl gespielter Punkte (P), Anzahl der Schläge pro Ballwechsel (S), Dauer der Ballwechsel (DR), Pause zwischen den Ballwechseln (RT), Relation aus Belastung und Pause (ERR), Gesamtspielzeit (TPT), aktive Spielzeit (RPT), effektive Spielzeit (EPT), Gesamtanzahl der Schläge (TS), Schlagfrequenz in der aktiven Spielzeit (SF_{RPT}), Schlagfrequenz in der Gesamtspielzeit (SF_{TPT}).

15.1.1 Zeitliche Belastungsstruktur im Spielverlauf in Abhängigkeit des Spielniveaus

Die Analyse zeigte einen signifikanten Haupteffekt der Spielprogression für die durchschnittliche Dauer der Pause zwischen den Ballwechseln (RT), die aktive Spielzeit (RPT), die Gesamtspielzeit (TPT), die Gesamtanzahl der Schläge (TS) und die Schlagfrequenz innerhalb der aktiven Spielzeit (SF_{RPT}). Es konnten zunächst keine statistisch signifikanten Interaktionseffekte zwischen der Spielprogression und dem Spielniveau festgestellt werden. Die zum Teil starken Haupteffekte des Spielniveaus waren lediglich für die Schlagfrequenz in der Gesamtspielzeit (SF_{TPT}) statistisch signifikant (s. Kapitel 15.1.2). Die Ergebnisse der Varianzanalyse sind in Tabelle 15.3 dargestellt.

Tabelle 15.3: Vergleich der zeitlichen Belastungsstruktur der einzelnen Sätze.

Squash ($n = 11$)									
Variable	Satz 1		Satz 2		Satz 3		ANOVA/Friedman		
	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>F/Chi</i>	<i>p</i>	η_p^2/N
R	19,73 [†]	1,68	16,91	2,47	20,64	4,46	3,512	,052	,281
P	18,27	1,56	16,27	2,53	19,18	3,74	3,266	,064	,266
S	7,75	2,23	8,04	3,38	9,24	3,74	3,020	,074	,251
DR [s]	11,25	3,36	11,23	4,72	13,16	5,51	2,914	,080	,245
RT [s]	8,93	1,17	9,28 [‡]	1,02	10,62 [§]	1,56	11,058	,005	,551
ERR	1,28	0,40	1,22	0,51	1,21	0,39	,433	,655	,046
RPT [s]	220,43	62,64	183,61 [‡]	60,73	282,80	149,85	5,270	,036	,369
TPT [s]	388,33	71,19	331,10 [‡]	67,74	493,14	210,29	5,401	,033	,375
EPT [%]	56,11	8,24	54,32	10,31	54,68	8,48	,899	,425	,091
TS	151,91	40,60	131,40 [‡]	41,19	198,27	100,07	5,233	,036	,368
SF _{RPT} [spm]	41,48 [†]	1,43	43,06	1,81	42,36	2,12	4,351	,029	,326
SF _{TPT} [spm]	23,23	3,25	23,38	4,51	23,12	3,42	-	-	-
	(24,35)	(3,67)	(24,13)	(8,83)	(24,70)	(5,25)	,182	,913	11

†: Signifikante Unterschiede zwischen Satz 1 und Satz 2. ‡: Signifikante Unterschiede zwischen Satz 2 und Satz 3.

§: Signifikante Unterschiede zwischen Satz 1 und Satz 3.

Anzahl gespielter Ballwechsel (R), Anzahl gespielter Punkten (P), Anzahl der Schläge pro Ballwechsel (S), Dauer der Ballwechsel (DR), Pause zwischen den Ballwechseln (RT), Relation aus Belastung und Pause (ERR), Gesamtspielzeit (TPT), aktive Spielzeit (RPT), effektive Spielzeit (EPT), Gesamtanzahl der Schläge (TS), Schlagfrequenz in der aktiven Spielzeit (SF_{RPT}), Schlagfrequenz in der Gesamtspielzeit (SF_{TPT}).

Für die Dauer der Pausen zwischen den Ballwechseln konnte eine starke systematische Zunahme im Spielverlauf von insgesamt 1,69 s festgestellt werden, wohingegen für die aktive Spielzeit, die Gesamtspielzeit und die Gesamtanzahl der Schläge zunächst eine deutliche, aber statistisch nicht signifikante Abnahme im Vergleich von Satz 1 und Satz 2 mit anschließendem statistisch signifikanten starken Anstieg in Satz 3 beobachtet werden konnte. Trotz eines lediglich marginal signifikanten Haupteffektes konnte eine statistisch signifikante deutliche Abnahme der Anzahl gespielter Ballwechsel im Vergleich von Satz 1 und Satz 2 mit deutlichem Wiederanstieg in Satz 3 registriert werden.

Für die Schlagfrequenz innerhalb der aktiven Spielzeit konnte eine statistisch signifikante starke Steigerung um 1,58 spm im Vergleich von Satz 1 und Satz 2 mit anschließend statistisch nicht signifikantem leichten Abfall in Satz 3 registriert werden. Bei visueller Kontrolle der Interaktionseffekte konnte diesbezüglich jedoch ein unterschiedlich starkes Verhalten in Abhängigkeit des Spielniveaus festgestellt werden ($F = 3,229$, $p = 0,051$, $\eta_p^2 = 0,152$). So nahm die SF_{RPT} sowohl Squash national als auch Squash regional zunächst im Vergleich von Satz 1 und Satz 2 statistisch signifikant erheblich zu. Während Squash national anschließend lediglich ein leichter nicht signifikanter Abfall der Schlagfrequenz beobachtet werden konnte, nahm diese

Squash regional im Vergleich von Satz 2 und Satz 3 statistisch signifikant stark ab. Abbildung 15.1.5 visualisiert die unterschiedlich starke Ausprägung der mittleren Schlagfrequenz in der aktiven Spielzeit (hier SF) im Spielverlauf in Abhängigkeit des Spielniveaus.

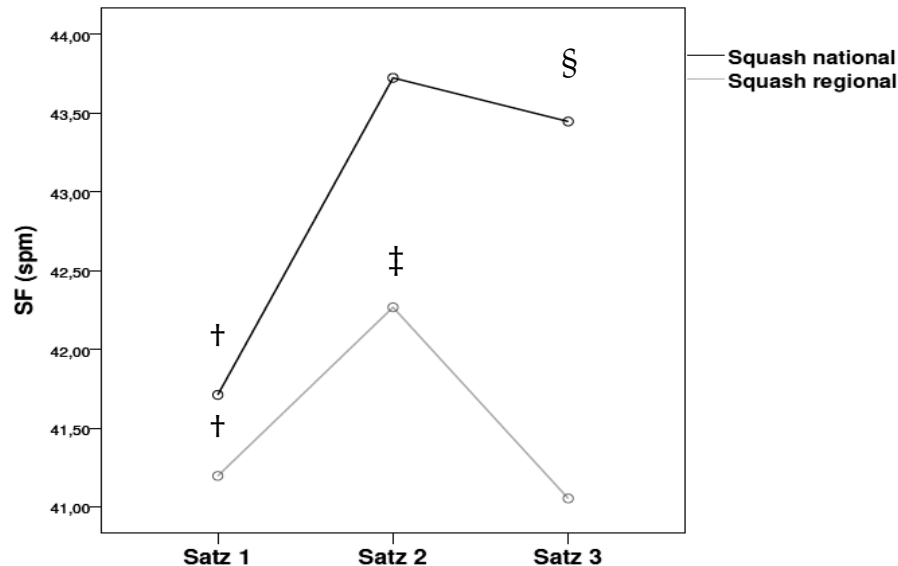


Abbildung 15.1.5: Durchschnittliche Schlagfrequenz innerhalb der aktiven Spielzeit der einzelnen Sätze Squash national und Squash regional.

15.1.2 Zeitliche Belastungsstruktur in Abhängigkeit des Spielniveaus

Ein Vergleich der durchschnittlichen zeitlichen Belastungsstruktur Squash national und Squash regional zeigte trotz einer deutlich höheren Anzahl der Schläge pro Ballwechsel ($d = 0,950$) sowie pro Satz ($d = 0,642$), deutlich längeren Ballwechseln ($d = 0,789$), einer erheblich höheren Relation aus Belastung und Pause ($d = 1,025$), einer erheblich höheren effektiven Spielzeit ($d = 1,069$) sowie einer massiv höheren Schlagfrequenz in der aktiven Spielzeit ($d = 1,080$) lediglich für die Schlagfrequenz bezogen auf die Gesamtspielzeit statistisch hoch signifikante und somit starke systematische Unterschiede. So führten die Probanden Squash national pro Minute der Gesamtspielzeit eines Satzes deutlich mehr Schläge als die Probanden Squash regional aus ($d = 1,503$). Per Post-Hoc-G*-Poweranalyse wurde die Teststärke für einen Effekt der Stärke $0,6 \leq d \leq 1,1$ mit 23 – 51 % bewertet. Tabelle 15.4 enthält die deskriptive Statistik ausgewählter Parameter der zeitlichen Belastungsstruktur in Abhängigkeit des Spielniveaus sowie die wesentlichen Kennzahlen der Interferenzstatistik.

Tabelle 15.4: Vergleich der mittleren Belastung im Herreneinzel Squash national und Squash regional.

Satz	Squash national ($n = 6$)		Squash regional ($m = 5$)		t-Test/U-Test		
Variable	M	SD	M	SD	t/z	df/U	p
S	9,53	2,80	6,92	2,67	1,569	9	,151
DR [s]	13,35	4,09	10,11	4,14	1,303	9	,225
ERR	1,41	0,37	1,03	0,37	1,693	9	,125
TPT [s]	416,13	86,53	389,86	120,57	,421	9	,684
EPT [%]	58,83	6,81	50,48	8,90	1,766	9	,111
TS	176,95	50,01	141,16	63,12	1,061	9	,316
SF _{RPT} [spm]	42,96	0,97	41,51	1,71	1,783	9	,108
SF _{TPT} [spm]	25,24	2,77	20,85	3,10	-	-	-
	(25,82)	(2,87)	(20,53)	(5,81)	-3,175	12	,001

Anzahl der Schläge pro Ballwechsel (S), Dauer der Ballwechsel (DR), Relation aus Belastung und Pause (ERR), effektive Spielzeit (EPT), Anzahl der Schläge (TS), Schlagfrequenz in der aktiven Spielzeit (SF_{RPT}), Schlagfrequenz in der Gesamtspielzeit (SF_{TPT}).

15.2 Aktivitätsprofil Squash

Innerhalb der Beschreibung unterschiedlicher Aktionen im Squash wurde dargelegt, dass Squash als Rückschlagsportart sich primär in Schlagaktionen, Laufaktionen und die Ballerwartungshaltung innerhalb der T-Zone unterteilen lässt (s. Kapitel 2). Basierend auf dieser generellen Unterteilung der Aktionen im Squash erfolgt die Darstellung des Aktivitätsprofils als Teil des Belastungsprofils in Abhängigkeit des Spielniveaus getrennt für die folgenden Profilaspekte:

- Bewegungsprofil,
- Schlagprofil und
- Nutzungsprofil der T-Zone.

15.2.1 Bewegungsprofil

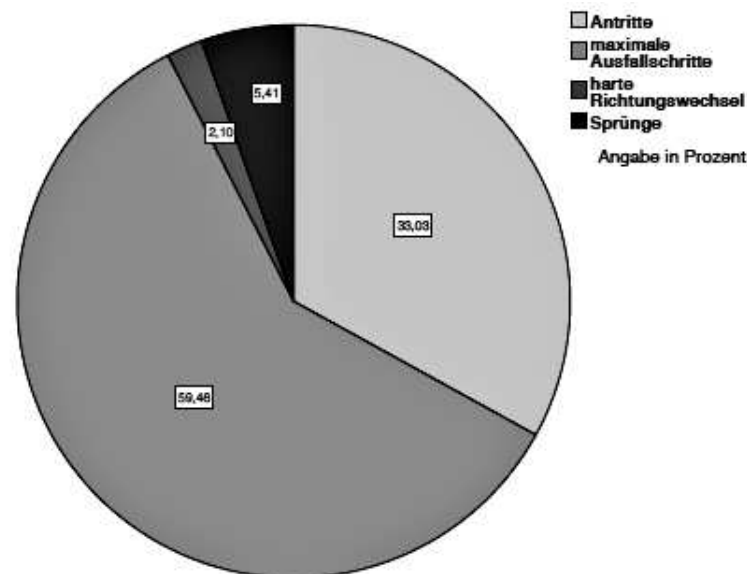
Tabelle 15.5 enthält die wesentlichen Aspekte des Bewegungsprofils. Die Anzahl und Rate der pro Satz bzw. insgesamt absolvierten Sprünge, maximalen Ausfallschritte, harten Richtungswechsel sowie der Antritte werden als Aktionen maximaler Intensität (A_{\max}) sowie deren Rate (AR_{\max}) zusammengefasst.

Tabelle 15.5: Bewegungsprofil pro Satz.

Variable	<i>n</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	Min	Max
A_{LE}	22	294,98	107,66	124,00	491,33
Steps [%]	22	48,02	10,02	28,25	66,28
Sidesteps [%]	22	46,40	9,74	28,15	65,64
$AR_{RPT_{LE}}$ [apm]	22	65,14	5,89	51,21	75,12
$AR_{TPT_{LE}}$ [apm]	22	45,61	7,47	26,30	54,38
$AR_{RPT_{max}}$ [apm]	22	6,60	2,07	2,61	10,26
$AR_{TPT_{max}}$ [apm]	22	3,60	1,18	1,60	6,01

Laufaktionen (A_{LE}), Schritte in Prozent der Laufaktionen (Steps), Sidesteps in Prozent der Laufaktionen (Sidesteps), Laufaktionen pro Minute der aktiven Spielzeit ($AR_{RPT_{LE}}$), Laufaktionen pro Minute der Gesamtspielzeit ($AR_{TPT_{LE}}$), Aktionen maximale Intensität pro Minute der aktiven Spielzeit ($AR_{RPT_{max}}$), Aktionen maximaler Intensität pro Minute der Gesamtspielzeit ($AR_{TPT_{max}}$).

Pro Satz wurden durchschnittlich $24,58 \pm 11,34$ Aktionen maximaler Intensität ausgeführt. Abbildung 15.2.1 zeigt die Zusammensetzung der Aktionen maximaler Intensität.

**Abbildung 15.2.1:** Prozentuale Anteile der verschiedenen maximal intensiven Aktionen.

Bei zusätzlicher Betrachtung der Schlagaktionen der einzelnen Spieler ohne Angabe ergab sich insgesamt eine Gesamttaktionsrate (AR) von $98,16 \pm 6,24$ apm in der aktiven und $54,24 \pm 8,98$ apm in der Gesamtspielzeit. Bei durchschnittlich insgesamt $884,95 \pm 322,97$ Laufaktionen im Spiel konnten im Mittel $23,73 \pm 10,72$ Antritte, $45,23 \pm 23,84$ maximale Ausfallschritte, $3,08 \pm 2,55$ Sprünge und $1,69 \pm 1,74$ harte Richtungswechsel beobachtet werden.

15.2.2 Schlagprofil

Tabelle 15.6 enthält die deskriptive Statistik der quantitativen Schlaganalyse. Die Schlagformen (Vorhand, Rückhand, Volley) und der Schlagort (vorne, hinten) werden prozentual zu der Anzahl der Gesamtschläge exklusive der Angaben (Netto-Gesamtschläge TS_{NET}), die geschlagenen Unforced Error und Winner absolut berichtet.

Tabelle 15.6: Schlagprofil pro Satz.

Variable	<i>n</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	Min	Max
TS_{NET}	22	70,60	27,27	27,67	114,67
FRONT [%]	22	21,17	5,89	9,64	31,30
BACK [%]	22	78,83	5,89	68,70	90,36
FH [%]	22	42,22	6,34	30,74	53,93
BH [%]	22	57,78	6,34	46,07	69,26
VOLLEY [%]	22	24,45	7,69	8,84	36,49
Unforced Error	22	3,19	1,56	0,67	7,83
Winner	22	6,17	2,86	2,67	15,33

Netto-Gesamtschläge (TS_{NET}), Schläge vorne (FRONT), Schläge hinten (BACK), Vorhandschläge (FH), Rückhandschläge (BH), Volleyschläge (Volley) jeweils in Prozent der Netto-Gesamtschläge.

Abbildung 15.2.2 zeigt die Verteilung der Vorhand- und Rückhandschläge auf dem Court.

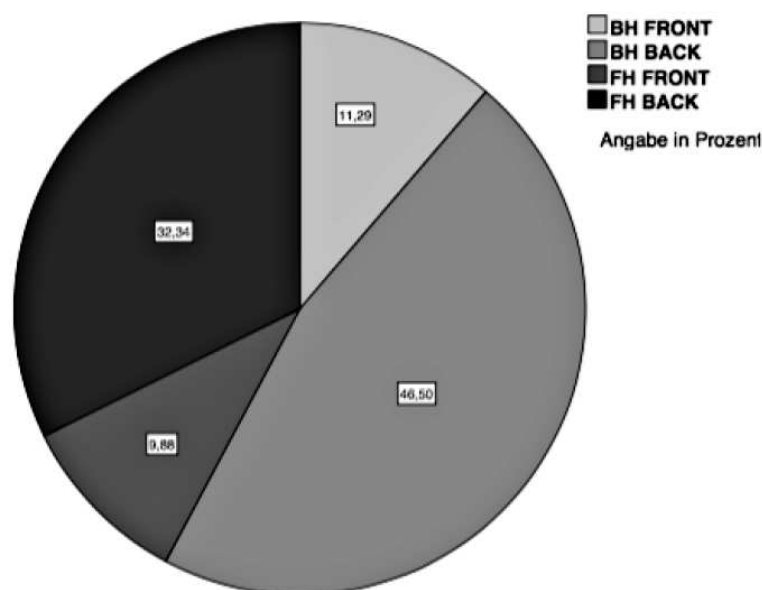


Abbildung 15.2.2: Vorhand- und Rückhandschläge in Prozent der Netto-Gesamtschläge.

15.2.3 Nutzungsprofil der T-Zone

Tabelle 15.7 enthält die deskriptive Statistik zum Nutzungsprofil der T-Zone.

Tabelle 15.7: Nutzungsprofil der T-Zone pro Satz.

Variable	<i>n</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	Min	Max
T erreicht	22	71,05	30,13	26,67	121,00
Standzeitpunkte T	22	53,86	23,79	22,67	109,67
Standzeit T [s]	22	0,44	0,08	0,29	0,56
kum. Standzeit T [s]	22	24,41	12,72	6,57	56,09

Anzahl der rechtzeitigen T-Erreichungen (T erreicht), Anzahl der Standzeitpunkte auf dem T (Standzeitpunkte T), Standzeit auf dem T (Standzeit T), kumulierte Standzeit auf dem T (kum. Standzeit T).

Die Standzeit in der T-Zone machte pro Satz durchschnittlich $10,20 \pm 2,53$ % der aktiven Spielzeit und $5,74 \pm 2,09$ % der Gesamtspielzeit aus. Während der aktiven Spielzeit des gesamten Spiels erreichten die Spieler durchschnittlich $213,16 \pm 90,39$ mal die T-Zone und nahmen dort $161,58 \pm 71,37$ mal die Ballerwartungshaltung ein. Insgesamt ergab sich somit in der aktiven Spielzeit des gesamten Spiels eine Standzeit innerhalb der T-Zone von $73,24 \pm 38,17$ s.

15.2.4 Aktivitätsprofil im Spielverlauf in Abhängigkeit von Spielniveau und Sieg und Niederlage

Die Analyse des Bewegungsprofils auf systematische Mittelwertunterschiede zwischen den einzelnen Sätzen zeigte statistisch signifikante starke Haupteffekte für die Anzahl der innerhalb der Sätze ausgeführten Laufaktionen (A_{LE}), die Anzahl maximal intensiver Aktionen (A_{max}) sowie die Rate maximal intensiver Aktionen pro Minute der aktiven Spielzeit ($AR_{RPT_{max}}$) und Gesamtspielzeit ($AR_{TPT_{max}}$). Es konnten zunächst keine signifikanten Interaktionseffekte festgestellt werden. Die zum Teil starken Haupteffekte des Spielniveaus waren für die Anzahl maximal intensiver Aktionen (A_{max}) sowie die Rate an Laufaktionen ($AR_{TPT_{LE}}$) und maximal intensiven Aktionen pro Minute der Gesamtspielzeit ($AR_{TPT_{max}}$) statistisch signifikant (s. Kapitel 15.2.5). Für Gewinner und Verlierer konnte kein signifikanter Haupteffekt festgestellt werden. Tabelle 15.8 enthält die Auswertung des Bewegungsprofils im Spielverlauf.

Tabelle 15.8: Bewegungsprofil der einzelnen Sätze.

Variable	Satz 1		Satz 2		Satz 3		ANOVA/Friedman		
	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>F/Chi</i>	<i>p</i>	η_p^2/N
A_{LE}	281,09	85,37	235,54 [‡]	75,31	368,32 [§]	199,97	9,798	,003	,352
A_{max}	20,77	10,30	22,00	7,97	30,95 [§]	20,10	6,144	,004	,263
$AR_{RPT_{max}}$ [apm]	5,56 [†]	1,96	7,45	2,37	7,10	3,23	6,339	,004	,260
$AR_{TPT_{max}}$ [apm]	3,12 [†]	1,18	4,00	1,29	3,77	1,59	5,295	,010	,227

†: Signifikante Unterschiede zwischen Satz 1 und Satz 2. ‡: Signifikante Unterschiede zwischen Satz 2 und Satz 3.

§: Signifikante Unterschiede zwischen Satz 1 und Satz 3.

Laufaktionen (A_{LE}), Aktionen maximaler Intensität (A_{max}), Aktionen maximaler Intensität pro Minute der aktiven Spielzeit ($AR_{RPT_{max}}$), Aktionen maximaler Intensität pro Minute der Gesamtspielzeit ($AR_{TPT_{max}}$).

Für die Anzahl der innerhalb eines Satzes ausgeführten Laufaktionen konnte zunächst eine statistisch marginal signifikante mittlere Abnahme um ~ 43 Aktionen im Vergleich von Satz 1 und Satz 2 mit anschließender statistisch hoch signifikanter starker Zunahme um ~ 133 Aktionen im Vergleich von Satz 2 und Satz 3 beobachtet werden. Ein Vergleich von Satz 1 und Satz 3 zeigte eine statistisch hoch signifikante starke Zunahme um ~ 90 Aktionen. Für die Anzahl der Aktionen maximaler Intensität pro Satz konnte bei sukzessiver Steigerung im Spielverlauf im Vergleich von Satz 1 und Satz 3 eine statistisch signifikante mittlere Zunahme festgestellt werden. Bei Betrachtung der Häufigkeit maximal intensiver Aktionen pro Minute der aktiven Spielzeit bzw. Gesamtspielzeit konnte eine statistisch signifikante starke Zunahme der Aktionsrate im Vergleich von Satz 1 und Satz 2 beobachtet werden.

Bei Analyse des Schlagprofils konnte lediglich für die Netto-Gesamtschläge (TS_{NET}) ein statistisch signifikanter Haupteffekt der Spielprogression festgestellt werden. Abbildung 15.2.3 visualisiert die durchschnittliche Anzahl der Netto-Gesamtschläge der einzelnen Sätze.

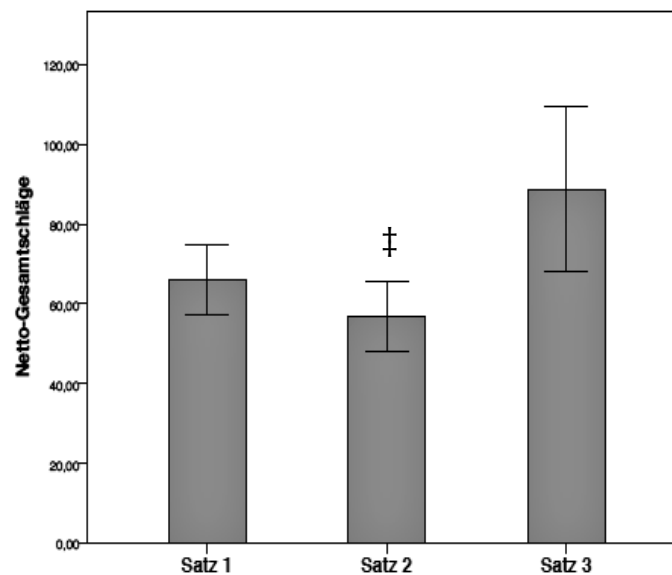


Abbildung 15.2.3: Netto-Gesamtschläge der einzelnen Sätze mit signifikantem Unterschied zwischen Satz 2 und Satz 3.

Nach statistisch marginal signifikanter Abnahme der Netto-Gesamtschläge um ~ 23 Schläge im Vergleich von Satz 1 und Satz 3 konnte eine hoch signifikante starke Zunahme dieser um ~ 32 Schläge im Vergleich von Satz 2 und Satz 3 beobachtet werden.

Bei visueller Kontrolle der Interaktionseffekte konnte ein unterschiedliches Verhalten hinsichtlich des prozentualen Anteils vorne gespielter Bälle (FRONT) im Spielverlauf in Abhängigkeit des Spielniveaus festgestellt werden (s. Abbildung 15.2.4). So nahm Squash national der prozentuale Anteil vorne geschlagener Bälle im Spielverlauf sukzessiv und statistisch signifikant stark zu, während Squash regional der Anteil vorne gespielter Bälle im Vergleich von Satz 1 und Satz 2 zunächst statistisch signifikant wahrnehmbar zu- und anschließend in Satz 3 im Vergleich zu Satz 1 und Satz 2 statistisch signifikant deutlich abnahm.

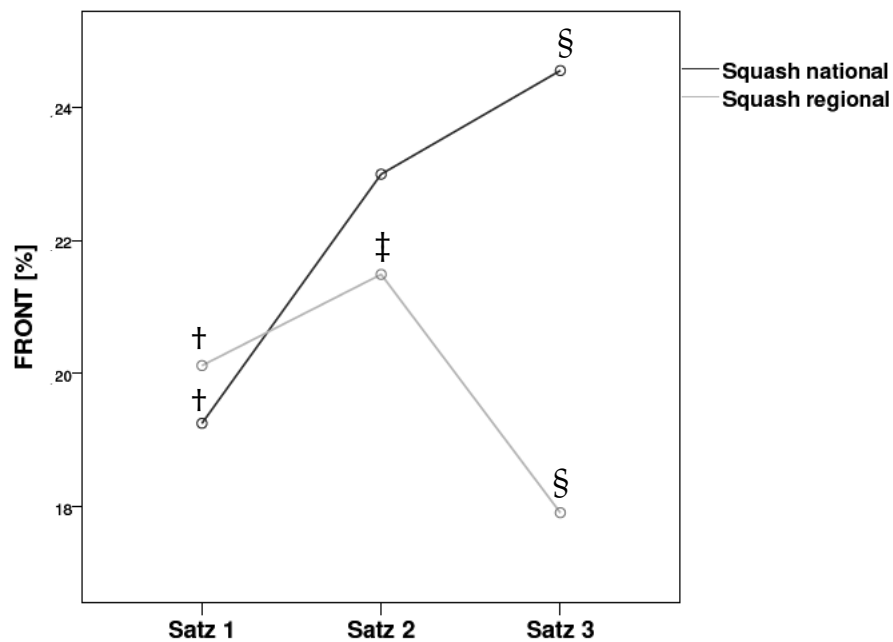


Abbildung 15.2.4: Vergleich des mittleren prozentualen Anteils vorne gespielter Bälle innerhalb der einzelnen Sätze Squash national und Squash regional.

Es konnte ein signifikanter Haupteffekt des Spielniveaus für die Anzahl geschlagener Unforced Error festgestellt werden (s. Kapitel 15.2.5). Für Gewinner und Verlierer zeigte sich ein signifikanter Haupteffekt für die Anzahl geschlagener Winner (s. Kapitel 15.2.6).

Hinsichtlich der T-Zonennutzung zeigten sich statistisch signifikante starke Haupteffekte der Spielprogression für die Anzahl der T-Zonenerreichungen, der Standzeitpunkte sowie die kumulierte Standzeit. Es konnten keine signifikanten Interaktionseffekte festgestellt werden. Statistisch signifikante starke Haupteffekte des Spielniveaus konnten für die durchschnittliche Standzeit T absolut (Standzeit T) sowie in Prozent der aktiven Spielzeit (Standzeit T_{RPT}) und der Gesamtspielzeit (Standzeit T_{TPT}) festgestellt werden (s. Kapitel 15.2.5). Für Gewinner und Verlierer konnte kein signifikanter Haupteffekt für die T-Zonennutzung nachgewiesen werden (s. Kapitel 15.2.6). Tabelle 15.9 enthält die deskriptive Statistik sowie die wesentlichen Kennzahlen der Interferenzstatistik zum Nutzungsverhalten der T-Zone in den einzelnen Sätzen.

Tabelle 15.9: Nutzungsprofil der T-Zone der einzelnen Sätze.

Variable	Satz 1		Satz 2		Satz 3		ANOVA/Friedman		
	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>F/Chi</i>	<i>p</i>	η_p^2/N
T erreicht	67,77 (62,50)	22,60 (28,00)	58,84 [‡] (59,50)	25,15 (45,88)	86,55 (72,50)	50,54 (102,00)	- 9,791	- ,007	- 2,000
Standzeitpunkte T	52,64 [‡]	20,76	44,03 [‡]	17,46	64,91	37,36	9,753	,002	,351
Standzeit T [s]	0,45	0,09	0,42	0,09	0,44	0,08	1,977	,160	,099
kum. Standzeit T [s]	24,48 [‡]	12,82	18,72 [‡]	8,73	30,04	19,28	9,801	,001	,353
Standzeit T _{RPT} [%]	10,58	3,07	9,98	2,59	10,03	2,73	,900	,416	,048
Standzeit T _{TPT} [%]	6,09	2,37	5,55	2,24	5,59	2,01	2,084	,139	,104

†: Signifikante Unterschiede zwischen Satz 1 und Satz 2. ‡: Signifikante Unterschiede zwischen Satz 2 und Satz 3.

§: Signifikante Unterschiede zwischen Satz 1 und Satz 3.

Anzahl der rechtzeitigen T-Erreichungen (T erreicht), Anzahl der Standzeitpunkte auf dem T (Standzeitpunkte T), Standzeit auf dem T (Standzeit T), kumulierte Standzeit auf dem T (kum. Standzeit T), Standzeit auf dem T in Prozent der aktiven Spielzeit (Standzeit T_{RPT}), Standzeit auf dem T in Prozent der Gesamtspielzeit (Standzeit T_{TPT}).

Dabei konnte für die genannten Variablen zunächst eine statistisch (marginal) signifikante leichte bis mittlere Abnahme im Vergleich von Satz 1 und Satz 2 mit anschließender statistisch signifikanter mittlerer Zunahme im Vergleich von Satz 2 und Satz 3 beobachtet werden. Bei Betrachtung der Standzeit in Relation zur aktiven Spielzeit bzw. Gesamtspielzeit der einzelnen Sätze konnten keine signifikanten Unterschiede nachgewiesen werden.

15.2.5 Aktivitätsprofil in Abhängigkeit des Spielniveaus

Wie Tabelle 15.10 entnommen werden kann, machten die Spieler Squash national im Durchschnitt prozentual zwar deutlich weniger Schritte und mehr Sidesteps innerhalb eines Satzes als die Spieler Squash regional ($d = 0,858$), jedoch war dieser Unterschied bei beidseitiger Testung statistisch lediglich marginal signifikant. Im Kontext der im Vorfeld formulierten Hypothese können diese Unterschiede bei einseitiger Testung jedoch als systematisch bewertet werden.

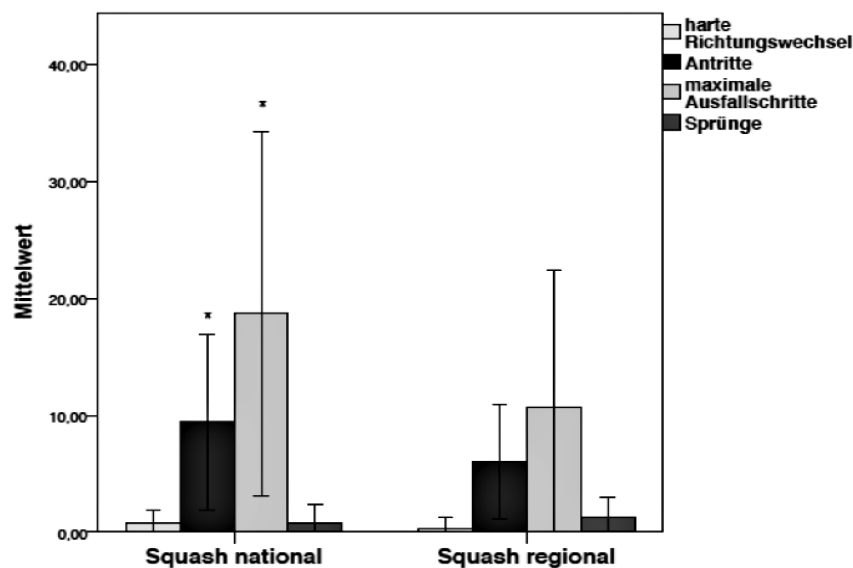
Sowohl hinsichtlich der Laufaktionsrate als auch für die Rate maximal intensiver Aktionen ergaben sich bezogen auf die Gesamtspielzeit statistisch signifikante Mittelwertunterschiede. So führten die Spieler Squash national mit ~ 10 Laufaktionen und ~ 2 maximal intensiven Aktionen mehr pro Minute der Gesamtspielzeit eines Satzes systematisch deutlich ($d_{\min} = 1,112$) mehr Laufaktionen und insbesondere maximal intensive Aktionen in derselben Zeit aus als die Spieler Squash regional. Die mittleren Unterschiede hinsichtlich der obigen Aktionsraten bezogen auf die aktive Spielzeit ($d_{\min} = 0,531$) waren statistisch nicht signifikant.

Tabelle 15.10: Vergleich des Bewegungsprofils Squash national und Squash regional.

Variable	Squash national ($n = 12$)		Squash regional ($n = 10$)		t-Test		
	M	SD	M	SD	t	df	p
Steps [%]	44,37	7,78	52,40	11,00	-2,003	20	,059
Sidesteps [%]	49,59	7,92	42,58	10,72	1,763	20	,093
A_{max}	29,66	11,78	18,47	7,41	2,597	20	,017
$AR_{RPT_{LE}}$ [apm]	78,46	5,76	75,11	6,93	1,240	20	,229
$AR_{TPT_{LE}}$ [apm]	58,68	6,37	48,52	9,20	2,819	20	,011
$AR_{RPT_{max}}$ [apm]	7,18	1,66	5,91	2,37	1,480	20	,155
$AR_{TPT_{max}}$ [apm]	4,21	1,02	2,87	0,94	3,172	20	,005

Anzahl der Schritte in Prozent der Anzahl aller Laufaktionen (Steps), Anzahl der Sidesteps in Prozent der Anzahl aller Laufaktionen (Sidesteps), Aktionen maximaler Intensität (A_{max}), Laufaktionen pro Minute der aktiven Spielzeit ($AR_{RPT_{LE}}$), Laufaktionen pro Minute der Gesamtspielzeit ($AR_{TPT_{LE}}$), Aktionen maximale Intensität pro Minute der aktiven Spielzeit ($AR_{RPT_{max}}$), Aktionen maximaler Intensität pro Minute der Gesamtspielzeit ($AR_{TPT_{max}}$).

Abbildung 15.2.5 zeigt den Vergleich der Anzahl der maximal intensiven Aktionen Squash national und Squash regional differenziert nach ihren Erscheinungsformen.

**Abbildung 15.2.5:** Durchschnittliche Anzahl der verschiedenen maximal intensiven Aktionen pro Satz Squash national und Squash regional.

Darüber hinaus konnte festgestellt werden, dass die Spieler Squash regional ($3,94 \pm 1,83$) deutlich und signifikant mehr Punkte im Spiel durch Unforced Error verloren als die Spieler Squash national ($2,57 \pm 0,98$, $t(20) = -2,249$, $d = 0,963$).

Obwohl die Spieler Squash national die T-Zone deutlich häufiger erreichten und deutlich häufiger innerhalb dieser die Ballerwartungshaltung einnahmen ($d_{min} = 0,580$), konnte diesbezüglich lediglich bei einseitiger Testung für die kumulierte Standzeit eine Systematik nachgewiesen werden ($t(20) = 1,782$, $p = 0,090$, $d = 0,763$).

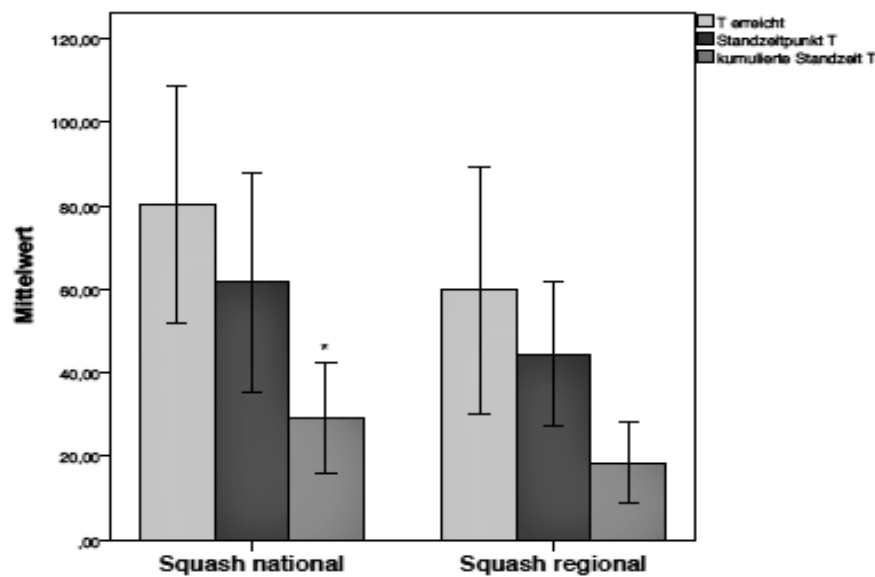


Abbildung 15.2.6: Komponenten des Nutzungsprofils der T-Zone pro Satz Squash national und Squash regional.

Die durchschnittliche Standzeit war Squash national jedoch statistisch signifikant und deutlich länger ($d = 1,121$) als Squash regional. Die kumulierte Standzeit lag auch sowohl in Prozent der aktiven Spielzeit als auch in Prozent der Gesamtspielzeit Squash national über der Squash regional. Diese deutlichen Mittelwertunterschiede ($d_{\min} = 1,178$) waren statistisch (hoch) signifikant (s. Tabelle 15.11).

Tabelle 15.11: Vergleich der Nutzung der T-Zone Squash national und Squash regional.

Variable	Squash national ($n = 12$)		Squash regional ($n = 10$)		t-Test		
	M	SD	M	SD	t	df	p
Standzeit T [s]	0,47	0,07	0,39	0,07	2,617	20	,017
Standzeit T_{RPT} [%]	11,38	2,41	8,78	1,93	2,751	20	,012
Standzeit T_{TPT} [%]	6,77	1,97	4,51	1,51	2,965	20	,008

Anzahl der rechtzeitigen T-Erreichungen (T erreicht), Standzeit auf dem T in Prozent der aktiven Spielzeit (Standzeit T_{RPT}), Standzeit auf dem T in Prozent der Gesamtspielzeit (Standzeit T_{TPT}).

15.2.6 Aktivitätsprofil von Gewinnern und Verlierern

Die Untersuchung potentieller Unterschiede im Aktivitätsprofil von Gewinnern und Verlierern zeigte lediglich für die Anzahl geschlagener Winner einen signifikanten Unterschied. So schlugen die Gewinner mit $7,91 \pm 2,81$ systematisch erheblich mehr Winner pro Satz als die Verlierer ($4,43 \pm 1,64$, $t(20) = 3,550$, $p = 0,002$, $d = 1,514$).

15.3 Korrelationen Belastung

Es konnten statistisch höchst signifikante starke positive Korrelationen zwischen der Anzahl der Schläge pro Ballwechsel (S), der Dauer der Ballwechsel (DR), der Relation aus Belastung und Pause (ERR), der effektiven Spielzeit (EPT) und der Gesamtspielzeit (TPT) beobachtet werden ($r = 0,894$, $p = 0,000$). Darüber hinaus konnte eine statistisch signifikante deutliche positive Korrelation von der Dauer der Pausen zwischen den Ballwechseln (RT) und der Dauer der Ballwechsel (DR) nachgewiesen werden ($r = 0,403$, $p = 0,031$). Ebenfalls zeigte sich eine statistisch signifikante deutliche positive Korrelation von DR mit der Anzahl maximal intensiver Aktionen pro Satz (A_{\max} , $r = 0,478$, $p = 0,025$). A_{\max} war unter Kontrolle des Einflusses der Spielstärke statistisch signifikant stark positiv mit der Anzahl vorne geschlagener Bälle korreliert (FRONT, $r = 0,791$, $p = 0,000$). Hier zeigte sich insbesondere ein statistisch marginal signifikanter deutlicher positiver Zusammenhang zwischen FRONT und der Anzahl an Antritten ($r = 0,396$, $p = 0,076$). Die Anzahl der Antritte zeigte sich wiederum statistisch höchst signifikant stark positiv mit der Anzahl maximal tiefer Ausfallschritte korreliert ($r = 0,794$, $p = 0,000$). Außerdem konnte eine statistisch signifikante deutliche positive Korrelation der geschlagenen Winner und Unforced Error registriert werden ($r = 0,476$, $p = 0,025$).

16 Beanspruchung und Energiebereitstellung im Squash

Die Auswertung der innerhalb der On-Court-Spiroergometrie während der Spielvorbereitung, des Spiels und der Nachbelastungsphase erhobenen kardialen, respiratorischen und metabolischen Parameter erfolgte reduziert auf die im Kontext dieser Arbeit wesentlichen Größen zur Beanspruchungsbeurteilung. Diese wurden nach Ausschluss der Ballwechsel mit anschließender außerordentlicher Störung für alle Spiele der On-Court-Spiroergometrie bestimmt. Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt genormt auf drei Sätze.

16.1 Beanspruchung im Squash

Abbildung 16.1.1, 16.1.2, 16.1.3 und 16.1.4 zeigen exemplarisch das Verhalten von Sauerstoffaufnahme, Herzfrequenz, Post-Belastung-Blutlaktatkonzentration und subjektivem Beanspruchungsempfinden während der einzelnen Phasen eines Squashspiels inklusive der Phasen der Spielvorbereitung.

Wie Abbildungen 16.1.1 und 16.1.2 entnommen werden kann, stiegen sowohl die Sauerstoffaufnahme als auch die Herzfrequenz direkt nach Spielbeginn von einem leicht über dem Ruheniveau liegenden Ausgangswert nach Ende des Einspielens streng monoton auf einen nahe bzw. oberhalb des zu einer Blutlaktatkonzentration von 4 mmol l^{-1} korrespondierenden Wert an und fielen nur in den Satzpausen deutlich ab. Jedoch waren sowohl die Sauerstoffaufnahme als auch die Herzfrequenz Schwankungen unterworfen, wobei die Sauerstoffaufnahme größere Schwankungen als die Herzfrequenz zeigte.

In längeren intensiven Belastungsphasen während der Sätze näherten sich Sauerstoffaufnahme und Herzfrequenz den innerhalb der Laufbandspiroergometrie ermittelten Maximalwerten an und überstiegen diese vereinzelt sogar. Die während der Spielsimulation durchschnittlich erreichte höchste Sauerstoffaufnahme entsprach mit $49,75 \pm 7,30 \text{ ml kg}^{-1} \text{ min}^{-1}$ $90,14 \pm 9,77 \%$ der $\dot{V}O_{2\text{max}}$. Die während der Sätze im Mittel maximal erreichte Herzfrequenz lag mit $181,77 \pm 13,31 \text{ bpm}$ bei $99,18 \pm 9,20 \%$ der HR_{max} .

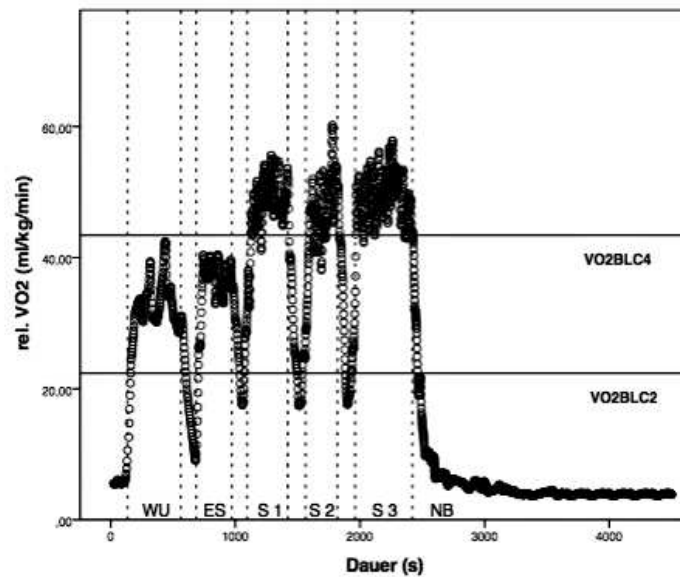


Abbildung 16.1.1: Exemplarisches Verhalten der Sauerstoffaufnahme während der On-Court-Spiroergometrie. Ruhe (R), individuelles Warm-Up (WU), Einspielen (ES), Satz 1 (S1), Satz 2 (S2), Satz 3 (S3), Nachbelastungsphase (NB).

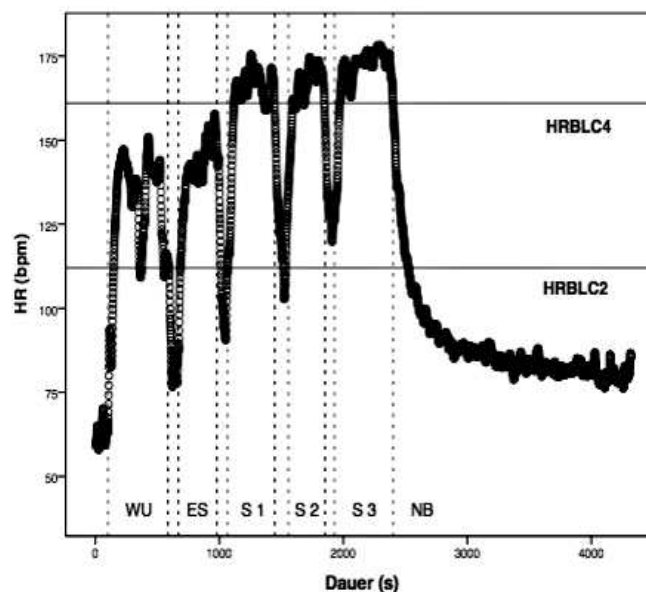


Abbildung 16.1.2: Exemplarisches Verhalten der Herzfrequenz während der On-Court-Spiroergometrie. Ruhe (R), individuelles Warm-Up (WU), Einspielen (ES), Satz 1 (S1), Satz 2 (S2), Satz 3 (S3), Nachbelastungsphase (NB).

Die obigen Abbildungen visualisieren die individuell höchste physische Auslastung im Spiel. Allerdings lagen die durchschnittliche Sauerstoffaufnahme und Herzfrequenz im Satz in 16 bzw. 14 Fällen unterhalb der innerhalb der Laufbandspiroergometrie ermittelten anaeroben Schwellenwerte. Alle Probanden agierten im Mittel oberhalb ihrer aeroben Schwellenwerte. Die Blutlaktatkonzentration stieg zunächst im Verlauf der Spielvorbereitung von einem Ruhewert von $0,91 \pm 0,32 \text{ mmol l}^{-1}$ auf einen

Wert von $1,68 \pm 0,90 \text{ mmol l}^{-1}$ an und nahm anschließend bei allen Probanden nach Beginn des Spiel weiter deutlich zu, blieb jedoch im Spielverlauf jeweils nach Ende eines Satzes gemessen annähernd konstant. In einzelnen Fällen konnte im Spielverlauf sogar ein Absinken der Post-Belastung-Blutlaktatkonzentration beobachtet werden (s. Abbildung 16.1.3). Subjektiv anhand der BORG-Skala bewertet nahm die empfundene Beanspruchung aller Probanden im Vergleich zur Spielvorbereitung zunächst deutlich zu. Anschließend konnte im Spielverlauf zum Teil eine sukzessive, aber deutlich verlangsamte Steigerung des RPE-Wertes beobachtet werden.

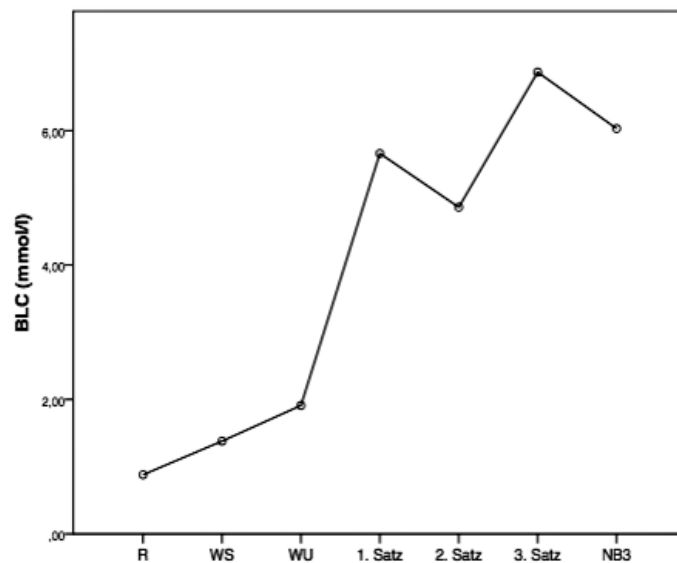


Abbildung 16.1.3: Exemplarisches Verhalten der Blutlaktatkonzentration während der On-Court-Spiroergometrie. Ruhe (R), individuelles Warm-Up, (WU), Einspielen (ES), Satz 1 (S1), Satz 2 (S2), Satz 3 (S3), 3. Nachbelastungsminute (NB3).

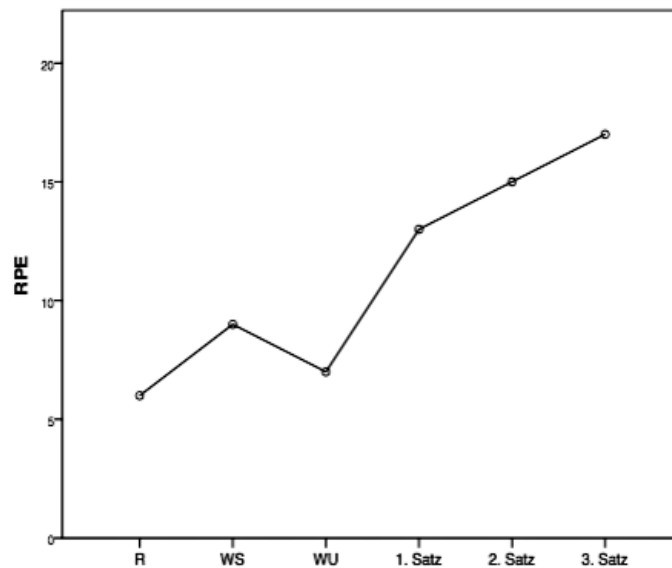


Abbildung 16.1.4: Exemplarisches Verhalten des subjektiven Beanspruchungsempfindens während der On-Court-Spiroergometrie. Ruhe (R), individuelles Warm-Up, (WU), Einspielen (ES), Satz 1 (S1), Satz 2 (S2), Satz 3 (S3).

Bei einer mittleren Atemfrequenz von $47,64 \pm 5,44$ brpm und einer Ventilation von $104,22 \pm 14,04$ l min⁻¹ lag die durchschnittliche Sauerstoffaufnahme der Spieler während eines Satzes bei $3,42 \pm 0,39$ l min⁻¹. Die durchschnittliche Kohlendioxidabgabe lag mit $3,45 \pm 0,42$ l min⁻¹ leicht über der durchschnittlichen Sauerstoffaufnahme. Die Sauerstoffaufnahme sowie die Herzfrequenz lagen durchschnittlich pro Satz nahe oder an der im Laufbandtest ermittelten 4 mmol l⁻¹- Schwelle. Die durchschnittliche Beanspruchung während der Sätze ist absolut sowie in Relation zu den innerhalb der Laufbandspiroergometrie erhobenen Referenzwerten in Tabelle 16.1 dargestellt.

Tabelle 16.1: Durchschnittliche Beanspruchung pro Satz.

Variable	<i>n</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	Min	Max
rel $\dot{V}O_2$ [$\text{ml kg}^{-1} \text{min}^{-1}$]	22	43,62	6,26	28,78	56,24
RER	22	1,01	0,04	0,94	1,08
HR [bpm]	22	166,83	9,02	148,33	179,83
BLC [mmol l^{-1}]	22	5,33	2,40	1,88	10,30
RPE	22	14,24	1,73	11,67	17,33
% $\dot{V}O_{2\text{max}}$ [%]	21	78,94	7,33	63,92	96,92
% $\dot{V}O_{2\text{BLC4}}$ [%]	22	95,82	13,14	75,61	133,79
%HR _{max} [%]	21	90,81	3,84	83,42	97,59
%HR _{BLC4} [%]	22	101,13	10,22	87,27	137,35

Durchschnittliche relative Sauerstoffaufnahme (rel $\dot{V}O_2$), durchschnittlicher respiratorischer Quotient (RER), durchschnittliche Herzfrequenz (HR), durchschnittliche Blutlaktatkonzentration am Satzende (BLC), durchschnittliches subjektives Beanspruchungsempfinden (RPE), durchschnittliche Sauerstoffaufnahme in Prozent der maximalen Sauerstoffaufnahme (% $\dot{V}O_{2\text{max}}$), der Sauerstoffaufnahme bei 4 mmol l^{-1} Blutlaktat (% $\dot{V}O_{2\text{BLC4}}$), durchschnittliche Herzfrequenz in Prozent der maximalen Herzfrequenz (%HR_{max}) sowie der Herzfrequenz bei 4 mmol l^{-1} Blutlaktat (%HR_{BLC4}).

16.1.1 Beanspruchung im Spielverlauf in Abhängigkeit vom Spielniveau und Sieg und Niederlage

Bei Analyse der mittleren Beanspruchung der einzelnen Sätze konnten statistisch signifikante starke Haupteffekte für die Atemfrequenz (BF), Ventilation ($\dot{V}E$), Herzfrequenz (HR), Post-Belastung-Blutlaktatkonzentration (BLC), die subjektive Beanspruchung (RPE) sowie die Parameter der kardialen Ausbelastung (%HR_{max}, %HR_{BLC4}) nachgewiesen werden. Für RER zeigte sich ein statistisch signifikanter starker Interaktionseffekt zwischen der Spielprogression und dem Spielniveau ($F(2;18) = 13,156$, $p = 0,000$, $\eta_p^2 = 0,594$). Die zum Teil starken Haupteffekte des Spielniveaus waren lediglich für rel $\dot{V}O_2$, HR sowie %HR_{max} statistisch signifikant (s. Kapitel 16.1.2). Die leichten Unterschiede zwischen Gewinnern und Verlierern waren statistisch nicht signifikant (s. Kapitel 16.1.3). Die deskriptive Statistik sowie die wichtigsten Kennzahlen der Interferenzstatistik zur Beanspruchung der einzelnen Sätze sind in Tabelle 16.2 dargestellt.

Tabelle 16.2: Beanspruchung der einzelnen Sätze.

Squash ($n = 22$)									
Variable	Satz 1		Satz 2		Satz 3		ANOVA		
	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>F</i>	<i>p</i>	η_p^2
BF [brpm]	44,78 [†]	5,12	47,94 [‡]	5,58	50,20 [§]	6,09	54,024	,000	,750
$\dot{V}E$ [l min ⁻¹]	99,03 [†]	17,24	104,59 [‡]	13,07	109,03 [§]	14,00	15,477	,000	,462
rel $\dot{V}O_2$ [ml kg ⁻¹ min]	43,14	6,20	43,75	7,07	43,98	6,31	,830	,444	,044
HR [bpm]	162,96 [†]	8,34	167,68 [‡]	9,97	168,85 [§]	9,55	23,559	,000	,567
BLC [mmol l ⁻¹]	4,86	2,52	5,28	2,41	5,82 [§]	2,48	8,528	,001	,321
RPE	12,86 [†]	2,10	14,05 [‡]	2,40	15,55 [§]	1,68	26,688	,000	,597

†: Signifikante Unterschiede zwischen Satz 1 und Satz 2. ‡: Signifikante Unterschiede zwischen Satz 2 und Satz 3.

§: Signifikante Unterschiede zwischen Satz 1 und Satz 3.

Durchschnittliche Atemfrequenz (BF), durchschnittliche Ventilation ($\dot{V}E$), durchschnittliche relative Sauerstoffaufnahme (rel $\dot{V}O_2$), durchschnittlicher respiratorischer Quotient (RER), durchschnittliche Herzfrequenz (HR), durchschnittliche Blutlaktatkonzentration am Satzende (BLC), durchschnittliches subjektives Beanspruchungsempfinden (RPE).

Die Ergebnisse zur Beanspruchung in Relation zu den innerhalb der Laufbandstufenergometrie gemessenen Maximal- bzw. Laktatschwellenwerten sind in den Tabellen 16.3 aufgeführt.

Tabelle 16.3: Beanspruchung der einzelnen Sätze prozentual zu den Maximalwerten sowie der Beanspruchung an den Laktatschwellen.

Squash ($n = 22$)									
Variable	Satz 1		Satz 2		Satz 3		ANOVA/Friedman		
	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>F/Chi</i>	<i>p</i>	η_p^2/df
% $\dot{V}O_{2max}$ [%] ¹	77,91	9,15	78,90	9,05	79,81	9,26	1,088	,348	,060
% $\dot{V}O_{2BLC4}$ [%]	94,97	14,43	95,77	12,73	96,71	13,89	,883	,396	,047
%HR _{max} [%] ²	88,85 [†]	4,68	91,16 [‡]	3,41	92,44 [§]	4,16	20,404	,000	,546
%HR _{BLC4} [%]	98,86 [†]	10,77	101,56 [‡]	9,81	102,95 [§]	10,46	-	-	-
	(95,71)	(10,00)	(99,59)	(5,00)	(100,45)	(7,00)	22,782	,000	2

†: Signifikante Unterschiede zwischen Satz 1 und Satz 2. ‡: Signifikante Unterschiede zwischen Satz 2 und Satz 3.

§: Signifikante Unterschiede zwischen Satz 1 und Satz 3.

Durchschnittliche Sauerstoffaufnahme in Prozent der maximalen Sauerstoffaufnahme (% $\dot{V}O_{2max}$) sowie der Sauerstoffaufnahme bei 4 mmol l⁻¹ Blutlaktat (% $\dot{V}O_{2BLC4}$), durchschnittliche Herzfrequenz in Prozent der maximalen Herzfrequenz (%HR_{max}) sowie der Herzfrequenz bei 4 mmol l⁻¹ Blutlaktat (%HR_{BLC4}).

Für die durchschnittliche Atemfrequenz, Ventilation, Herzfrequenz, Blutlaktatkonzentration sowie die subjektive Beanspruchung konnte eine systematische Zunahme dieser Beanspruchungsparameter im Spielverlauf in Form zum Teil höchst signifikanter, mittlerer bis starker Effekte festgestellt werden. Bei Betrachtung der Sauerstoffaufnahme bzw. Herzfrequenz in Prozent der Maximal- bzw. Laktatschwellenwerte konnte für alle Parameter eine sukzessive Zunahme im Spielverlauf beobachtet werden, welche jedoch lediglich für die Parameter der kardialen Ausbelastung einen statistisch höchst signifikant starken Effekt darstellte. Während Squash national der RER im Vergleich

der Sätze annähernd gleich war, konnte Squash regional eine sukzessive Abnahme im Spielverlauf mit statistisch signifikantem starken Unterschied im Vergleich von Satz 1 und Satz 2 sowie von Satz 1 und Satz 3 beobachtet werden. Das Verhalten des durchschnittlichen RER im Spielverlauf in Abhängigkeit des Spielniveaus ist in Abbildung 16.1.5 veranschaulicht.

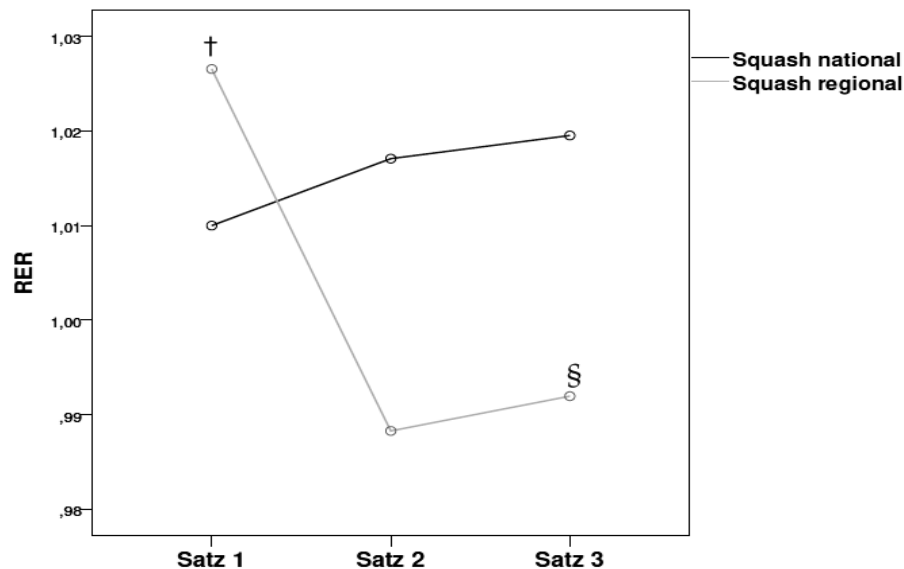


Abbildung 16.1.5: Durchschnittlicher RER der einzelnen Sätze Squash national und Squash regional.

16.1.2 Beanspruchung in Abhängigkeit des Spielniveaus

Bei Vergleich der durchschnittlichen Beanspruchung Squash national mit der Squash regional konnten für die durchschnittliche relative Sauerstoffaufnahme ($d = 0,915$), die durchschnittliche Herzfrequenz ($d = 1,031$) sowie bei einseitiger Testung für die durchschnittliche Post-Belastung-Blutlaktatkonzentration ($d = 0,836$) starke systematische Unterschiede nachgewiesen werden. In Relation zu den im Laufbandstufentest erhobenen Maximalwerten war die durchschnittliche Sauerstoffaufnahme bei den regional aktiven Spielern mit $\sim 2\%$ nur geringfügig und nicht statistisch signifikant höher als bei den Nationalspielern ($d = 0,320$). In Bezug auf den anaeroben Schwellenwert konnte hingegen ein merklich höherer Prozentwert Squash regional festgestellt werden ($d = 0,711$), der jedoch nicht als systematisch eingestuft werden konnte. Für die Herzfrequenz ausgedrückt in Prozent der HR_{\max} blieb mit einer um $\sim 3\%$ höheren Herzfrequenz Squash regional ein systematischer starker Unterschied erhalten ($d = 0,928$). Betrachtet man die Herzfrequenz in Prozent der Herzfrequenz an der anaeroben Schwelle, so ließen sich mit $\sim 8\%$ statistisch marginal deutlich höhere Werte bei den Spielern Squash regional feststellen ($d = 0,834$). Tabelle 16.4 enthält die wesentlichen Ergebnisse der Untersuchung auf Mittelwertunterschiede.

Tabelle 16.4: Vergleich der mittleren Beanspruchung pro Satz Squash national und Squash regional.

Variable	Squash national ($n = 12$)		Squash regional ($m = 10$)		t-Test		
	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>t</i>	<i>df</i>	<i>p</i>
rel $\dot{V}O_2$ [ml kg ⁻¹ min]	46,03	5,25	40,73	6,39	2,136	20	,045
HR [bpm]	170,64	6,69	162,25	9,61	2,407	20	,026
BLC [mmol l ⁻¹]	4,47	2,08	6,36	2,45	-1,952	20	,065
RPE	14,01	2,06	14,53	1,29	-,719	18,736	,481
% $\dot{V}O_{2max}$ [%] ^a	77,79	5,25	80,21	9,24	-,748	19	,464
% $\dot{V}O_{2BLC4}$ [%]	91,29	6,75	100,38	16,18	-1,660	11,630	,124
%HR _{max} [%] ^a	89,25	3,60	92,53	3,47	-2,123	19	,047
%HR _{BLC4} [%]	97,25	4,28	105,79	13,31	-1,947	10,557	,079

^a: Auswertung über $n = 11$, $m = 12$.

Durchschnittliche relative Sauerstoffaufnahme ($\dot{V}O_2$), durchschnittliche Herzfrequenz (HR), durchschnittliche Blutlaktatkonzentration am Satzende (BLC), durchschnittliches subjektives Beanspruchungsempfinden am Satzende (RPE), durchschnittliche Sauerstoffaufnahme in Prozent der maximalen Sauerstoffaufnahme (% $\dot{V}O_{2max}$), der Sauerstoffaufnahme bei 4 mmol l⁻¹ Blutlaktat (% $\dot{V}O_{2BLC4}$), durchschnittliche Herzfrequenz in Prozent der maximalen Herzfrequenz (%HR_{max}) sowie der Herzfrequenz bei 4 mmol l⁻¹ Blutlaktat (%HR_{BLC4}).

16.1.3 Beanspruchung von Gewinnern und Verlierern

Es konnten keine signifikanten Mittelwertunterschiede zwischen Gewinnern und Verlierern für die Beanspruchungsparameter gefunden werden. Obwohl auch innerhalb der beiden untersuchten Spielniveaus keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen Gewinnern und Verlierern festgestellt werden konnten ließen sich zum Teil wahrnehmbare Unterschiede ($d > 0,3$) feststellen, die sich beim Vergleich der Stichproben untereinander in gegenläufigen Trends verhielten. So wiesen innerhalb der Probandengruppe Squash national die Gewinner eine leicht höhere durchschnittliche Sauerstoffaufnahme sowie metabolische und kardiale Ausbelastung auf ($0,221 \leq d \leq 0,642$, s. Tabelle 16.5), wohingegen Squash regional mit Ausnahme der durchschnittlichen Blutlaktatkonzentration und der durchschnittlichen Herzfrequenz in Relation zur Schwellenherzfrequenz die Leistungs- und Auslastungsparameter der Verlierer höhere Werte zeigten ($0,004 \leq d \leq 0,638$, s. Tabelle 16.6).

Tabelle 16.5: Vergleich der durchschnittlichen Beanspruchung von Gewinnern und Verlierern pro Satz Squash national.

Squash national							
Variable	Gewinner ($n = 6$)		Verlierer ($m = 6$)		t-Test		
	M	SD	M	SD	t/z	df	p
$\dot{V}O_2$ [ml kg ⁻¹ min]	46,64	4,16	45,43	6,51	,383	10	,710
HR [bpm]	169,60	6,23	171,68	7,55	-,522	10	,613
BLC [mmol l ⁻¹]	4,81	1,95	4,13	2,33	,557	10	,348
% $\dot{V}O_{2max}$ [%] ^a	78,86	4,79	76,65	6,03	,727	9	,486
% $\dot{V}O_{2BLC4}$ [%]	93,21	2,94	89,36	9,10	,985	10	,348
%HR _{max} [%] ^a	90,29	2,94	88,00	4,24	1,060	9	,317
%HR _{BLC4} [%]	97,85	3,62	96,64	5,14	,475	10	,645

Durchschnittliche relative Sauerstoffaufnahme ($\dot{V}O_2$), durchschnittliche Herzfrequenz (HR), durchschnittliche Blutlaktatkonzentration am Satzende (BLC) und durchschnittliche Sauerstoffaufnahme in Prozent der maximalen Sauerstoffaufnahme sowie der Sauerstoffaufnahme bei einer Blutlaktatkonzentration von 4 mmol l⁻¹ (% $\dot{V}O_{2max}$, % $\dot{V}O_{2BLC4}$).

Tabelle 16.6: Vergleich der durchschnittlichen Beanspruchung von Gewinnern und Verlierern pro Satz Squash regional.

Squash regional							
Variable	Gewinner ($n = 5$)		Verlierer ($m = 5$)		t-Test		
	M	SD	M	SD	t/z	df	p
$\dot{V}O_2$ [ml kg ⁻¹ min]	38,70	6,78	42,77	5,96	-	-	-
	(38,76)	(11,12)	(46,59)	(11,10)	-,522	10	,690
HR [bpm]	159,31	8,83	165,20	5,96	-1,008	8	,343
BLC [mmol l ⁻¹]	6,44	2,73	6,27	2,44	,102	8	,021
% $\dot{V}O_{2max}$ [%]	79,20	6,23	81,22	12,28	-,327	8	,752
% $\dot{V}O_{2BLC4}$ [%]	100,41	11,93	100,35	21,13	,006	8	,996
%HR _{max} [%] ^a	92,40	4,59	92,66	2,45	-,112	8	,914
%HR _{BLC4} [%]	108,36	17,56	103,21	8,58	,589	8	,572

Durchschnittliche relative Sauerstoffaufnahme ($\dot{V}O_2$), durchschnittliche Herzfrequenz (HR), durchschnittliche Blutlaktatkonzentration am Satzende (BLC) und durchschnittliche Sauerstoffaufnahme in Prozent der maximalen Sauerstoffaufnahme sowie der Sauerstoffaufnahme bei einer Blutlaktatkonzentration von 4 mmol l⁻¹ (% $\dot{V}O_{2max}$, % $\dot{V}O_{2BLC4}$).

Die Teststärke wurde für eine Effektstärke von $0,3 \leq d \leq 0,642$ in Abhängigkeit der jeweiligen Stichprobengröße mit 13 – 27 % bewertet.

16.2 Korrelationen Beanspruchung

Bei Untersuchung der metabolischen, kardialen und subjektiven Beanspruchungsparameter auf Zusammenhänge untereinander konnte unter Kontrolle des Einflusses der Spielstärke eine statistisch hoch signifikante starke positive Korrelation der durchschnittlichen Post-Belastung-Blutlaktatkonzentration (BLC) mit der durchschnittlichen Sauerstoffaufnahme in Relation zur anaeroben Schwellenleistung ($\%VO_{2BLC4}$, $r = 0,569$, $p = 0,007$) und insbesondere mit der durchschnittlichen Herzfrequenz in Relation zum Maximum sowie der entsprechenden Schwellenherzfrequenz festgestellt werden ($\%HR_{max}$, $r = 0,575$, $p = 0,006$; $\%HR_{BLC4}$, $r = 0,672$, $p = 0,001$). Darüber hinaus zeigte sich insbesondere eine statistisch signifikante deutliche positive Korrelation von RPE und $\%HR_{max}$ ($r = 0,499$, $p = 0,021$).

16.3 Energetisches Profil Squash

Bei Betrachtung der gesamten Spielzeit inklusive der Satzpausen betrug die Nettosauerstoffaufnahme insgesamt $62429,47 \pm 16667,93$ ml. Davon entfielen $29,89 \pm 8,53$ % auf Satz 1, $25,01 \pm 3,39$ % auf Satz 2, $35,78 \pm 9,17$ % auf Satz 3 sowie $4,72 \pm 1,50$ % auf die erste und $4,60 \pm 1,28$ % auf die zweite Satzpause. Insgesamt ergab sich für die Gesamtspielzeit inklusive der Satzpausen ein Energiebedarf von $20248,17 \pm 5461,93$ J kg⁻¹. Nach Reduktion auf die in Kapitel 11.4 definierten energetisch relevanten Phasen des Spiels ergab sich insgesamt ein Netto-Energiebedarf von $18626,08 \pm 5351,14$ J kg⁻¹, von dem anteilig $89,76 \pm 3,31$ % aerob, $8,22 \pm 2,26$ % anaerob alaktazid und $2,02 \pm 1,38$ % anaerob laktazid bereitgestellt wurden³. Tabelle 16.7 enthält die durchschnittlichen Nettoenergiebeträge und (anteilige) metabolische Leistung pro Satz.

Tabelle 16.7: Durchschnittliche Energiebereitstellung pro Satz.

Variable	<i>n</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	Min	Max
W_{AER} [J kg ⁻¹]	22	5614,94	1742,57	2252,05	9480,04
W_{PCr} [J kg ⁻¹]	22	483,33	109,89	325,66	658,63
W_{BLC} [J kg ⁻¹]	22	110,42	49,12	26,84	219,55
W_{TOT} [J kg ⁻¹]	22	6208,69	1783,71	2822,99	10263,81
$\%W_{AER}$ [%]	22	89,76	3,31	79,78	94,47
$\%W_{PCr}$ [%]	22	8,22	2,26	4,41	13,45
$\%W_{BLC}$ [%]	22	2,02	1,38	0,39	6,77

Absolut und relativ zur Gesamtenergiemenge (W_{TOT}) aerob (W_{AER} , $\%W_{AER}$), anaerob alaktazid (W_{PCr} , $\%W_{PCr}$) und anaerob laktazid bereitgestellte Energiemenge (W_{BLC} , $\%W_{BLC}$).

³Die Berechnung dieser sowie der nachfolgenden Ergebnisse basieren zunächst auf dem konservativen Berechnungsansatz.

Der durchschnittliche Energiebedarf pro Satz entsprach einer metabolischen Leistung (P_{TOT}) von $15,28 \pm 2,22 \text{ W kg}^{-1}$ bzw. $4309,20 \pm 485,21 \text{ kJ h}^{-1}$.

16.3.1 Energiebereitstellung im Spielverlauf in Abhängigkeit vom Spielniveau und Sieg und Niederlage

Es konnten starke statistisch signifikante Haupteffekte der Spielprogression für die von den verschiedenen Energiestoffwechseln bereitgestellten Energiemengen (W_{AER} , W_{PCr} , W_{BLC}) und die insgesamt bereitgestellte Energiemenge (W_{TOT}) festgestellt werden. Dabei ergaben sich keine signifikanten Interaktionseffekte. Für die metabolische Leistung (P_{TOT}) konnte ein statistisch signifikanter starker Haupteffekt des Spielniveaus nachgewiesen werden (s. Kapitel 16.3.2). Die Unterschiede zwischen Gewinnern und Verlierern waren nicht signifikant (s. Kapitel 16.3.3). Abbildung 16.3.1 zeigt die bereitgestellten Energiemengen der verschiedenen Energiestoffwechsel der einzelnen Sätze.

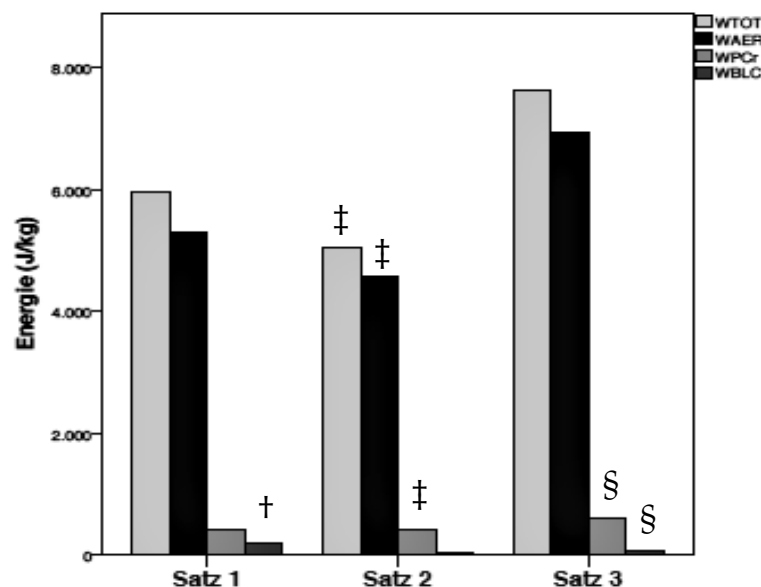


Abbildung 16.3.1: Vergleich der anteiligen Energiebereitstellung der verschiedenen Energiestoffwechselwege der einzelnen Sätze.

Für die bereitgestellte Energiemenge konnte insgesamt nach einem statistisch marginal signifikanten mittleren Abfall des Energiebedarfs im Vergleich von Satz 1 und Satz 2 ein statistisch hoch signifikanter starker Anstieg des Energiebedarfs im Vergleich von Satz 2 und Satz 3 festgestellt werden. Ebenfalls ergab sich ein statistisch marginal signifikanter deutlicher Unterschied hinsichtlich der Gesamtenergie zwischen Satz 1 und Satz 3. Hinsichtlich der durch die unterschiedlichen Energiestoffwechsel bereitgestellten Energiemengen konnte ein zu dem zuvor Beschriebenen analoges Verhalten für die aerobe Energiemenge beobachtet werden. Daneben war die dem letzten Satz zugeordnete anaerob alaktazid bereitgestellte Energiemenge deutlich und höchst signifikant höher als in Satz 1 und Satz 2. Die dem ersten bzw. dem zweiten Satz

zugeordneten Energiebeiträge des anaerob alaktaziden Energiestoffwechsels entsprachen $56,97 \pm 13,05$ % bzw. $48,32 \pm 10,38$ % der innerhalb der Satzpausen verbrauchten Gesamtenergie sowie $52,62 \pm 13,05$ % bzw. $51,95 \pm 14,75$ % des im Vorfeld berechneten Normwertes der anaerob alaktaziden Kapazität. Die der schnellen Komponente der Nachatmung nach Spielende zuzuordnenden Energiemenge betrug $73,83 \pm 19,52$ % der anaerob alaktaziden Kapazität. Ebenfalls konnte eine starke hoch signifikante Abnahme des Beitrages sowie der Beteiligung des anaerob alaktaziden Energiestoffwechsels im Vergleich von Satz 1 mit den nachfolgenden Sätzen festgestellt werden. Die (anteilige) metabolische Leistung der verschiedenen Energiestoffwechselwege für alle Probanden ist zusammen mit den wesentlichen Kennzahlen der Varianzanalyse in Tabelle 16.8 dargestellt.

Tabelle 16.8: Energiebereitstellung der einzelnen Sätze.

Variable	Squash ($n = 22$)								
	Satz 1		Satz 2		Satz 3		ANOVA/Friedman		
	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>F/Chi</i>	<i>p</i>	η_p^2/df
%W _{AER} [%]	88,82 (89,16)	4,23 (5,00)	90,32 (89,99)	2,72 (4,00)	89,69 (90,33)	4,15 (8,00)	- 3,909	- ,142	- 2
%W _{PCr} [%]	7,47	2,11	8,68	2,67	9,28	3,94	2,999	,062	,143
%W _{BLC} [%]	3,72 [†] (3,01)	2,94 (3,00)	1,00 (0,93)	0,84 (1,00)	1,03 [§] (0,92)	0,69 (1,00)	- 25,182	- ,000	- 2
P _{TOT} [W kg ⁻¹]	15,25	2,18	15,26	2,736	15,33	2,12	,092	,912	,005

†: Signifikante Unterschiede zwischen Satz 1 und Satz 2. ‡: Signifikante Unterschiede zwischen Satz 2 und Satz 3.

§: Signifikante Unterschiede zwischen Satz 1 und Satz 3.

Relativ zur Gesamtenergiemenge (W_{TOT}) aerob (%W_{AER}), anaerob alaktazid (%W_{PCr}) und anaerob alaktazid bereitgestellte Energiemenge (%W_{BLC}) sowie insgesamt erbrachte metabolische Leistung (P_{TOT}).

16.3.2 Energiebereitstellung in Abhängigkeit des Spielniveaus

Während die metabolische Leistung P_{TOT} bei einseitiger Testung Squash national ($16,03 \pm 1,74$ W kg⁻¹) signifikant und deutlich größer war als Squash regional ($14,39 \pm 2,48$ W kg⁻¹, $t(20) = 1,814$, $p = 0,085$, $d = 0,777$), zeigte der Vergleich der anteiligen Energiebereitstellung keine signifikanten Unterschiede (s. Abbildung 16.3.2).

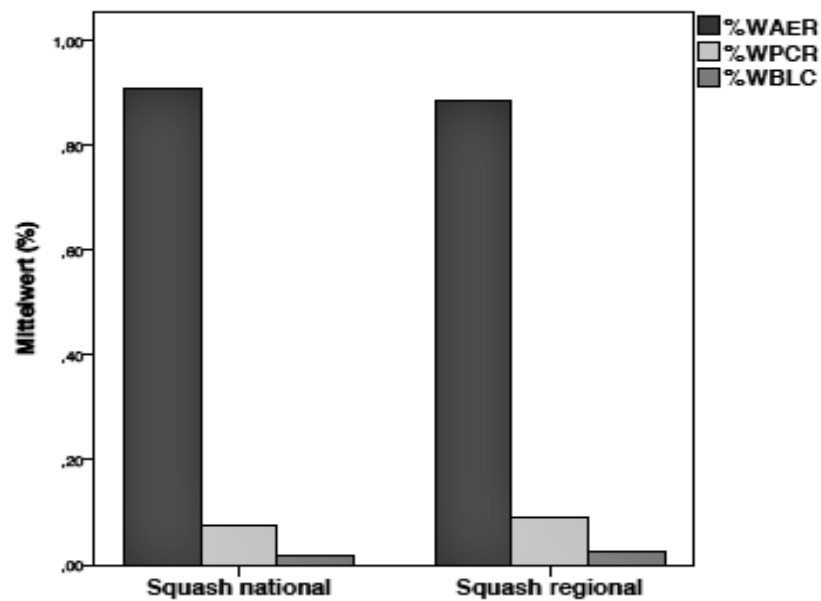


Abbildung 16.3.2: Vergleich der anteiligen Energiebereitstellung Squash national und Squash regional.

Eine Analyse der Dauer der Sitzphasen in den Satzpausen als Berechnungsgrundlage des anaerob alaktaziden Energiebetrages zeigte, dass die Probanden Squash national in beiden Satzpausen (hoch) signifikant kürzer saßen als die Probanden Squash regional. In Abbildung 16.3.3 ist der Unterschied visualisiert.

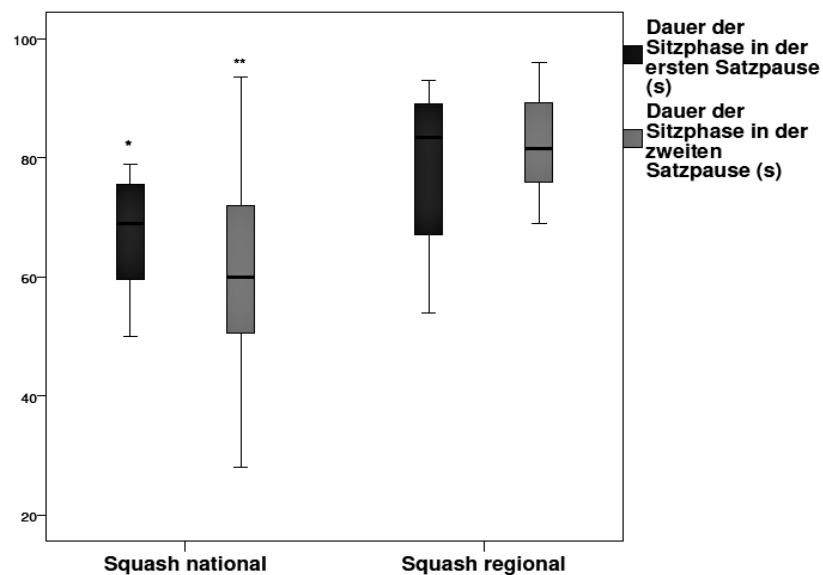


Abbildung 16.3.3: Vergleich der Dauer der Sitzphasen der ersten und zweiten Satzpause Squash national und Squash regional.

16.3.3 Energiebereitstellung von Gewinnern und Verlierern

Der Vergleich der Energiebereitstellung von Gewinnern und Verlierern zeigte keine signifikanten Unterschiede. Dennoch konnte bei separater Betrachtung der Spiel-niveaus analog zur durchschnittlichen Sauerstoffaufnahme Squash national bei

Gewinnern ($16,34 \pm 1,28 \text{ J kg}^{-1}$) eine leicht höhere durchschnittliche metabolische Leistung als bei Verlierern festgestellt werden ($15,72 \pm 2,19 \text{ W kg}^{-1}$, $d = 0,352$), wohingegen bei den Probanden Squash regional gegenläufiges beobachtet werden konnte. So war die metabolische Leistung Squash regional bei den Verlierern ($15,17 \pm 2,59 \text{ W kg}^{-1}$) deutlich höher als bei den Gewinnern ($13,61 \pm 2,37 \text{ W kg}^{-1}$, $d = 0,626$).

Die Teststärke wurde für eine Effektstärke von $d = 0,626$ in Abhängigkeit der Stichprobengröße mit 23 % bewertet.

16.4 Modellerweiterung

Stufe I

Unter Berücksichtigung der potentiell in den initialen Gehphasen der Satzpause zur PCr-Resynthese aufgenommenen Sauerstoffmenge erhöht sich die anaerob alaktazide Energiemenge in Pause 1 um $34,20 \pm 16,98 \text{ J kg}^{-1}$ sowie in Pause 2 um $38,81 \pm 30,37 \text{ J kg}^{-1}$. Dies entsprach insgesamt einer Erhöhung der anaerob alaktazid bereitgestellten Energiemenge um $5,16 \pm 3,06 \%$. Dadurch ergab sich eine anteilige Energiebereitstellung von $89,40 \pm 3,35 \%$ aerob, $8,59 \pm 2,30 \%$ anaerob alaktazid und $2,01 \pm 1,38 \%$ anaerob laktazid. Der Unterschied zu der konservativen Berechnungsmethode war nicht signifikant. Die durch die Berechnungsmethode der Gehaktivität innerhalb der initialen Gehphase der Satzpause zugeordnete Energiemenge entsprach durchschnittlich $18,43 \pm 2,88 \text{ J kg}^{-1}$. In Abbildung 16.4.1 ist die anteilige Energiebereitstellung nach konservativer Berechnungsmethode (EP 1) und unter zusätzlicher Berücksichtigung der PCr-Resynthese in den Gehphasen der Satzpausen dargestellt.

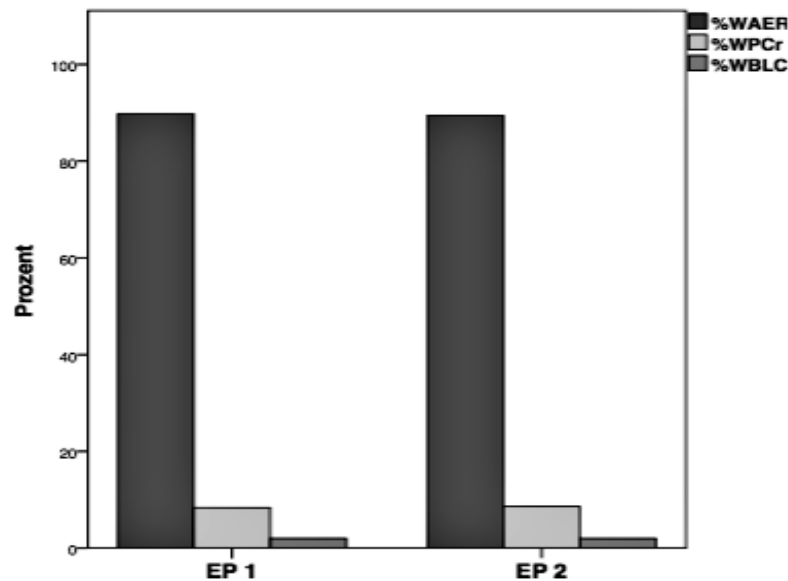


Abbildung 16.4.1: Vergleich der anteiligen Energiebereitstellung der verschiedenen Energiestoffwechselwege in Prozent des Gesamtenergiebedarfs nach konservativer Berechnungsmethode (EP 1) und nach Stufe I der Modellerweiterung (EP 2).

Da das dritte Validitätskriterium des Berechnungsmodells (s. Kapitel 11.4.2, Formel (11.4.4)) bei der Hälfte aller Probanden verletzt war, wurden die Resultate der ersten Stufe der Modellerweiterung nicht in die Berechnung der Folgestufen miteinbezogen. Die sich dadurch ergebende potentielle Unterschätzung der Beteiligung des anaerob alaktaziden Energiestoffwechsels an der Energiebereitstellung wird in Kapitel 21.7 diskutiert.

Stufe II

Für die durchschnittliche Modellfunktion der Sauerstoffkinetik der EPOC in der Nachbelastungsphase ergaben sich Amplituden von $a = 2729 \pm 477 \text{ ml min}^{-1}$ und $b = 356 \pm 161 \text{ ml min}^{-1}$, Zeitkonstante von $\tau_a = 0,803 \pm 0,137 \text{ min}$ und $\tau_b = 12,57 \pm 4,72 \text{ min}$ und eine Ruhesauerstoffaufnahme $c = 335 \pm 530 \text{ ml min}^{-1}$. Es konnten keine signifikanten Unterschiede in Abhängigkeit des Spielniveaus festgestellt werden. Bei zusätzlicher Berücksichtigung der potentiellen PCr-Resynthese in den Pausen zwischen den Ballwechseln ergab sich unter Miteinbezug des durchschnittlichen Körpergewichts der Probanden von 78,94 kg bei Veranschlagung eines kalorischen Äquivalents von $21,131 \text{ J ml}^{-1}$ eine potentiell im Satz zusätzlich anaerob alaktazid bereitgestellte Energiemenge von $1534,42 \pm 321,73 \text{ J kg}^{-1}$. Da dieser Energiebetrag zuvor der aeroben Energiebereitstellung zugerechnet wurde, wurde die innerhalb des Satzes durchschnittlich aerob bereitgestellte Energiemenge um die berechnete Größe reduziert. Die Mittelwertunterschiede zwischen den beiden Spielniveaus waren gering und nicht signifikant ($t(20) = 0,494$, $p = 0,627$, $d = 0,211$).

Stufe III

Die Amplitude und Zeitkonstante der durchschnittlichen Laktatabfallkinetik in der Nachbelastung entsprachen $4,92 \pm 2,62 \text{ mmol l}^{-1}$ bzw. $15,11 \pm 5,67 \text{ min}$. Auch diesbezüglich existierten keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden untersuchten Spielniveaus. Auf Basis der Laktatabfallkinetik konnte eine während eines Satzes durchschnittlich eliminierte Laktatmenge von $0,91 \pm 0,34 \text{ mmol l}^{-1}$ berechnet werden. Dies entsprach einer zuvor nicht erfassten anaerob laktazid bereitgestellten Energiemenge von $57,69 \pm 21,59 \text{ J kg}^{-1}$. Der Mittelwertunterschied Squash national und Squash regional wurden als mittelgroß bewertet ($d = 0,583$), war jedoch statistisch nicht signifikant ($t(20) = -1,361, p = 0,189$).

Nach Modellerweiterung wurden pro Satz $63,43 \pm 8,10 \%$ der Energie aerob, $33,56 \pm 7,07 \%$ anaerob alaktazid und $3,01 \pm 1,69 \%$ anaerob laktazid bereitgestellt. Bei einseitiger Testung waren die deutlichen Mittelwertunterschiede der anteiligen Energiebeträge zwischen den untersuchten Spielniveaus ($d_{\min} = 0,565$) für die anteilig aerob sowie anaerob laktazid bereitgestellte Energiemenge signifikant (s. Tabelle 16.9).

Tabelle 16.9: Vergleich der anteiligen Energiebereitstellung Squash national und Squash regional nach Modellerweiterung.

Variable	Squash national ($n = 12$)		Squash regional ($m = 10$)		t-Test/U-Test		
	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>t/z</i>	<i>df/U</i>	<i>p</i>
%W _{AER}	66,15	8,22	60,17	7,00	1,814	20	,085
%W _{PCr}	31,42	7,51	36,12	5,86	-1,610	20	,123
%W _{BLC}	2,43	1,27	3,70	1,92	-	-	-
	(1,94)	(2,00)	(3,16)	(2,00)	-1,319	40	0,59

Relativ zur Gesamtenergiemenge (W_{TOT}) aerob (%W_{AER}), anaerob alaktazid %W_{PCr}) und anaerob laktazid bereitgestellte Energiemenge (%W_{BLC}).

16.5 Korrelationen und Unterschiede Energiebereitstellung

Es konnten (höchst) signifikante Korrelationen zwischen der anteiligen Energiebereitstellung nachgewiesen werden. So war der aerobe Energieanteil (%W_{AER}) höchst signifikant und stark negativ mit dem anaerob alaktaziden (%W_{PCr}, $r = -0,916, p = 0,000$) und dem anaerob laktaziden Energieanteil (%W_{BLC}) korreliert ($r = -0,768, p = 0,000$). Darüber hinaus zeigte sich eine signifikante starke positive Korrelation von %W_{PCr} und %W_{BLC} ($r = -0,512, p = 0,015$).

In Bezug auf Hypothese H 3.1 und H 3.2 wurden darüber hinaus die (anteiligen) Energiebeträge der verschiedenen Energiestoffwechsel auf signifikante Unterschiede hinsichtlich ihrer zentralen Tendenzen untersucht. Die aerobe Energiemenge (W_{AER}) war höchst signifikant erheblich größer als die anaerobe Energiemenge (W_{ANAER} , $t(20) = -13,775$, $p = 0,000$). Dabei war die anaerob alaktazide Energiemenge (W_{PCr}) höchst signifikant erheblich größer als die anaerob laktazide Energiemenge (W_{BLC} , $t(20) = 15,305$, $p = 0,000$, $d = 4,299$). Auch anteilig war $\%W_{\text{AER}}$ ($89,11 \pm 4,00 \%$) höchst signifikant erheblich größer als $\%W_{\text{ANAER}}$ ($10,89 \pm 4,00 \%$, $z = -4,107$, $p = 0,000$, $n = 22$, $d = 3,626$) sowie $\%W_{\text{PCr}}$ höchst signifikant erheblich größer als $\%W_{\text{BLC}}$ ($1,67 \pm 1,00 \%$, $z = -4,107$, $p = 0,000$, $n = 22$, $d = 3,626$).

17 Körperliche Leistungsfähigkeit im Squash

17.1 Aerobe Leistungsfähigkeit Squash

Bis auf einen Probanden konnten alle Studienteilnehmer anhand der in Kapitel 11.1 definierten Ausbelastungskriterien als ausbelastet bewertet werden. Ein Proband musste den Test aus muskulären Gründen vorzeitig in Stufe 7 bei einem RPE von 18 beenden, so dass für diesen keine Maximalwerte bestimmt werden konnten. Der Proband wurde folglich von den entsprechenden Auswertungen ausgeschlossen. In Tabelle 17.1 sind die zentralen Ergebnisse der Laufbandspiroergometrie zu Leistung und physischer Ausbelastung dargestellt.

Tabelle 17.1: Maximale Leistung und physische Ausbelastung innerhalb des Laufbandstufentests.

Variable	<i>n</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	Min	Max
D [min]	21	30,51	7,85	10,50	45,50
Stufe	21	8,25	2,23	2,50	12,50
v_{\max} [m s^{-1}]	21	3,45	0,45	2,30	4,30
$\text{rel } \dot{V}\text{O}_{2\max}$ [$\text{ml kg}^{-1} \text{min}^{-1}$]	21	55,59	7,53	36,04	66,53
BLC_{\max} [mmol l^{-1}]	21	11,04	2,05	7,49	17,76
HR_{\max} [bpm]	21	183,48	13,93	152,00	206,00
$\% \text{HR}_{\max\text{Norm}}$ [%]	21	101,51	3,96	95	107
RER_{\max}	21	1,10	0,05	1,01	1,20
$\dot{V}\text{E}/\dot{V}\text{O}_{2\max}$	21	34,08	3,83	26,70	42,30
RPE_{\max}	21	20,00	-	20,00	20,00

Testdauer (D), maximale Geschwindigkeit (v_{\max}), relative maximale Sauerstoffaufnahme ($\text{rel } \dot{V}\text{O}_{2\max}$), maximale Blutlaktatkonzentration (BLC_{\max}), maximale Herzfrequenz (HR_{\max}), maximale Herzfrequenz in Relation zur Altersnorm ($\% \text{HR}_{\max\text{Norm}}$), maximaler respiratorischer Quotient (RER_{\max}), maximales Atemäquivalent für O_2 ($\dot{V}\text{E}/\dot{V}\text{O}_{2\max}$), maximales subjektives Beanspruchungsempfinden (RPE).

Die relative maximale Sauerstoffaufnahme entsprach durchschnittlich $130,49 \pm 15,35 \%$ der nach Wassermann bestimmten Altersnorm (s. Anhang A.2).

Tabelle 17.2 enthält die deskriptive Statistik zur Beanspruchung der Probanden an den fixen 2 und 4 mmol l^{-1} -Laktatschwellen.

Tabelle 17.2: Geschwindigkeit, Sauerstoffaufnahme und Herzfrequenz an der fixen aeroben und anaeroben Schwelle.

Variable	<i>n</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	Min	Max
v_{BLC2} [$m s^{-1}$]	22	1,95	0,79	0,37	3,17
rel $\dot{V}O_{2BLC2}$ [$ml kg^{-1} min$]	22	33,81	11,93	17,78	55,19
HR_{BLC2} [bpm]	22	133,55	26,87	80	177
v_{BLC4} [$m s^{-1}$]	22	2,83	0,45	1,93	3,53
rel $\dot{V}O_{2BLC4}$ [$ml kg^{-1} min$]	22	46,31	7,89	27,03	58,64
HR_{BLC4} [bpm]	22	166,55	18,27	108	195

Geschwindigkeit bei 2 und 4 $mmol l^{-1}$ Blutlaktat (v_{BLC2} , v_{BLC4}), relative Sauerstoffaufnahme bei 2 und 4 $mmol l^{-1}$ Blutlaktat (rel $\dot{V}O_{2BLC2}$, rel $\dot{V}O_{2BLC4}$), Herzfrequenz bei 2 und 4 $mmol l^{-1}$ Blutlaktat (HR_{BLC2} , HR_{BLC4}).

Die Sauerstoffaufnahme an der fixen aeroben Schwelle entsprach durchschnittlich $61,26 \pm 16,03$ % der maximalen Sauerstoffaufnahme, die fixe anaerobe Schwelle wurde durchschnittlich bei $83,82 \pm 5,36$ % der $\dot{V}O_{2max}$ erreicht. Analog ergab sich eine Schwellenherzfrequenz von $72,90 \pm 11,49$ % der maximalen Herzfrequenz an der fixen aeroben und von $90,26 \pm 6,03$ % der HR_{max} an der fixen anaeroben Schwelle.

17.1.1 Aerobe Leistungsfähigkeit in Abhängigkeit des Spielniveaus

Der Vergleich der aeroben Leistungsfähigkeit Squash national und Squash regional ergab zum Teil hoch signifikante systematische Unterschiede mit mittlerer bis starker Effektstärke und zeigte insgesamt eine deutlich höhere aerobe Leistungsfähigkeit Squash national.

Tabelle 17.3: Vergleich von maximaler Geschwindigkeit, maximaler Sauerstoffaufnahme und maximaler Herzfrequenz Squash national und Squash regional.

Variable	Squash national (<i>n</i> = 11)		Squash regional (<i>m</i> = 10)		t-Test		
	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>t</i>	<i>df</i>	<i>p</i>
v_{max} [$m s^{-1}$]	3,69	0,32	3,19	0,43	3,104	19	,006
rel $\dot{V}O_{2max}$ [$ml kg^{-1} min^{-1}$]	60,01	4,09	50,64	7,46	3,646	19	,002
HR_{max} [bpm]	190,64	11,24	175,60	12,63	2,887	19	,009

Maximale Geschwindigkeit (v_{max}), relative maximale Sauerstoffaufnahme (rel $\dot{V}O_{2max}$), maximale Herzfrequenz (HR_{max}).

Wie aus Tabelle 17.3 abgeleitet werden kann, beendeten die Probanden Squash national den Test ca. 9 min später in einer entsprechend höheren Stufe (+2,52) bei einer um $0,5 m s^{-1}$ deutlich höheren anteilig zur Testdauer errechneten Endgeschwindigkeit ($d = 1,356$). Für die testspezifische relative maximale Sauerstoffaufnahme konnte ein hoch signifikanter starker Unterschied von $\sim 10 ml min^{-1} kg^{-1}$ gefunden

werden ($d = 1,593$). Wird jedoch hierbei zusätzlich das Alter der Probanden berücksichtigt, so ergibt ein Vergleich der maximalen Sauerstoffaufnahme in Relation zur Altersnorm nach Wassermann zum einen keinen signifikanten Unterschied mehr, zum anderen kann die maximale Leistung orientiert an der Altersnorm Squash regional höher bewertet werden als Squash national. Auch ein Vergleich der maximalen Herzfrequenz der beiden Spielniveaus zeigte hoch signifikant eine Squash national mit ~ 15 bpm deutlich höhere HR_{\max} als Squash regional ($d = 1,261$). Abbildung 17.1.1 zeigt die relative maximale Sauerstoffaufnahme und deren Bewertung in Relation zur Norm für die beiden Spielniveaus.

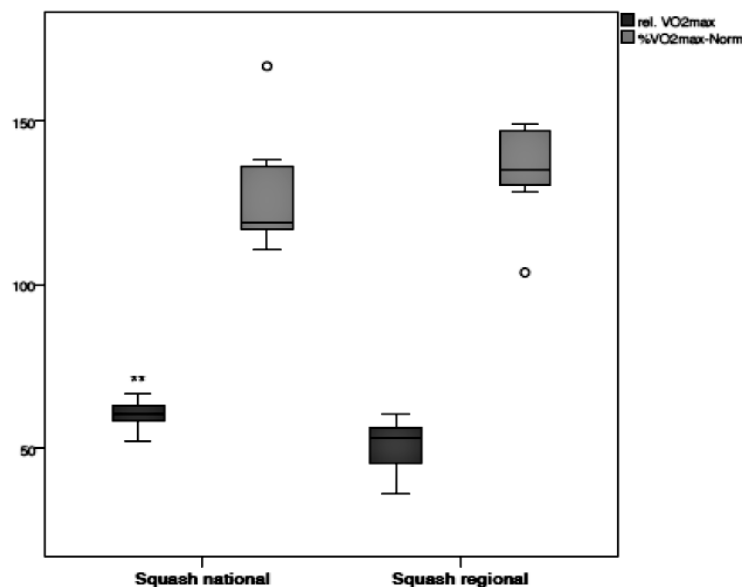


Abbildung 17.1.1: Vergleich der testspezifischen relativen maximalen Sauerstoffaufnahme ($\dot{V}O_{2\max}$ [$\text{ml min}^{-1} \text{kg}^{-1}$]) im Verhältnis zur Altersnorm nach Wassermann ($\% \dot{V}O_{2\max\text{Norm}}$) Squash national und Squash regional.

Wie in den Tabellen 17.4 und 17.5 dargestellt ergab der Vergleich der zu den Laktatwerten von 2 bzw. 4 mmol l^{-1} korrespondierenden Leistung und Beanspruchung Squash national und Squash regional an beiden Schwellenwerten statistisch signifikante bis höchst signifikante Unterschiede mit starker Effektstärke ($1,072 \leq d \leq 1,634$). Dabei war die Leistung an den Laktatschwellen hinsichtlich aller Parameter Squash national höher als Squash regional. So erreichten die Nationalspieler eine Blutlaktatkonzentration von 2 mmol l^{-1} bei einer um $\sim 0,8 \text{ m s}^{-1}$ höheren Geschwindigkeit ($d = 1,206$). Betrachtet man die Geschwindigkeit v_{BLC2} zusätzlich in Relation zu der Endgeschwindigkeit v_{\max} , so lag ein statistisch hoch signifikanter starker Mittelwertunterschied von $\sim 20\%$ vor ($d = 1,356$). Bezogen auf die physiologischen Parameter waren sowohl bei einer Blutlaktatkonzentration von 2 als auch von 4 mmol l^{-1} die relative Sauerstoffaufnahme ($d_{\min} = 1,447$) und die Herzfrequenz ($d_{\min} = 1,264$) der Nationalspieler höher als die der regional aktiven Spieler. Der statistisch hoch signifikante starke Unterschied der Sauerstoffaufnahme bei 2 mmol l^{-1} Blutlaktat entsprach

einem starken Unterschied von $\sim 20\%$ relativ zur maximalen Sauerstoffaufnahme ($d = 1,555$). Der hoch signifikante starke Unterschied der Herzfrequenz von ~ 37 bpm entsprach seinerseits relativ zum Maximum einem starken prozentualen Unterschied von $\sim 14\%$ ($d = 1,575$). Bei einer Blutlaktatkonzentration von 4 mmol l^{-1} unterschieden sich die Sauerstoffaufnahme Squash national und Squash regional mit einem Mittelwertunterschied von $10,52 \text{ ml kg}^{-1} \text{ min}^{-1}$ stark ($d = 1,447$). Dies entsprach wiederum einem starken Unterschied von 5% in Relation zur maximalen Sauerstoffaufnahme ($d = 1,072$). Lediglich der Mittelwertunterschied von 20 bpm bzgl. der zu der 4 mmol l^{-1} -Laktatschwelle korrespondierenden Herzfrequenz verlor in Relation zur maximalen Herzfrequenz ($\sim 4\%$) seine statistische Signifikanz. Die Effektstärke war diesbezüglich gering ($d = 0,373$).

Tabelle 17.4: Vergleich von Geschwindigkeit, Sauerstoffaufnahme und Herzfrequenz bei einer Blutlaktatkonzentration von 2 und 4 mmol l^{-1} Squash national und Squash regional.

Variable	Squash national ($n = 12$)		Squash regional ($m = 10$)		t-Test /U-Test		
	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>S</i>	<i>t/z</i>	<i>df/U</i>	<i>p</i>
$v_{\text{BLC}2} [\text{m s}^{-1}]$	2,32	0,64	1,50	0,74	2,817	20	,011
$\text{rel } \dot{V}\text{O}_{2\text{BLC}2} [\text{ml kg}^{-1} \text{ min}]$	40,57	7,29	25,70	9,10	-	-	-
	(42,74)	(11,19)	(22,00)	(16,11)	-2,967	15	,002
$\text{HR}_{\text{BLC}2} [\text{bpm}]$	148,83	20,30	115,20	22,26	-	-	-
	(11,50)	(5)	(8,00)	(2,50)	-2,967	15	,025
$v_{\text{BLC}4} [\text{m s}^{-1}]$	3,05	0,34	2,57	0,44	2,894	20	,009
$\text{rel } \dot{V}\text{O}_{2\text{BLC}4} [\text{ml kg}^{-1} \text{ min}]$	50,56	5,63	41,22	7,33	3,380	20	,003
$\text{HR}_{\text{BLC}4} [\text{bpm}]$	175,83	11,01	155,40	19,443	-	-	-
	(178,50)	(14)	(160,50)	(24)	-2,904	22	,003

Geschwindigkeit bei 2 und 4 mmol l^{-1} Blutlaktat ($v_{\text{BLC}2}$, $v_{\text{BLC}4}$), relative Sauerstoffaufnahme bei 2 und 4 mmol l^{-1} Blutlaktat ($\text{rel } \dot{V}\text{O}_{2\text{BLC}2}$, $\text{rel } \dot{V}\text{O}_{2\text{BLC}4}$), Herzfrequenz bei 2 und 4 mmol l^{-1} Blutlaktat ($\text{HR}_{\text{BLC}2}$, $\text{HR}_{\text{BLC}4}$).

Tabelle 17.5: Darstellung und Vergleich der Leistung und Beanspruchung an den Laktatschwellen prozentual zu den Maxima Squash national und Squash regional.

Variable		Squash national ($n = 11$)		Squash regional ($m = 10$)		t-Test/U-Test		
		M	SD	M	SD	t/z	df/U	p
BLC2	%v _{max} [%]	65,38	11,14	45,60	19,06	2,929	19	,008
	%VO _{2max} [%]	70,41	9,54	50,69	15,45	3,558	19	,002
	%HR _{max} [%]	79,71	7,47	65,40	10,58	3,605	19	,002
BLC4	%v _{max} [%]	82,90	4,58	80,65	7,70	-	-	-
		(84,86)	(7,00)	(81,25)	(9,00)	-,634	46	,557
	%VO _{2max} [%]	85,46	3,97	80,49	5,28	2,453	19	,024
	%HR _{max} [%]	91,98	2,34	88,36	8,19	-	-	-
		(92,39)	(4,00)	(91,81)	(9,00)	-,563	47	,605

Geschwindigkeit bei 2 und 4 mmol l⁻¹ Blutlaktat in Prozent der maximalen Geschwindigkeit (% v_{\max}), Sauerstoffaufnahme bei 2 und 4 mmol l⁻¹ Blutlaktat in Prozent der maximalen Sauerstoffaufnahme (% VO_{\max}), Herzfrequenz bei 2 und 4 mmol l⁻¹ Blutlaktat in Prozent der maximalen Herzfrequenz (% HR_{\max}).

17.1.2 Aerobe Leistungsfähigkeit von Gewinnern und Verlierern

Es konnten keine signifikanten Unterschiede bzgl. der aeroben Leistungsfähigkeit von Gewinnern und Verlierern festgestellt werden.

17.2 Motorische Fähigkeiten Squash

Die Testergebnisse in den sportmotorischen Tests der Probanden der Nebenuntersuchung ($n = 21$) bildeten die Grundlage des Fitnessprofils Squash. Tabelle 17.6 enthält die deskriptive Statistik der Ergebnisse der sportmotorischen Tests.

Tabelle 17.6: Ergebnisse der sportmotorischen Tests.

Variable	n	M	SD	Min	Max
SR [cm]	21	36,22	6,69	25,00	49,70
FT [cm]	21	10,16	5,06	2,00	17,80
EBSI [Kontakte]	21	2,14	4,79	0	18
EBSII [s]	19	24,64	6,63	9,00	38,28
CDS [s]	19	11,67	1,38	9,67	15,10
Sprint [s]	21	4,51	0,34	4,04	5,30
JR [cm]	21	48,07	8,24	31	62,00
STJ [cm]	21	220,33	19,87	190	258
MS [cm]	21	576,05	52,29	485,00	640,00
MSR [Bahnen]	19	108,00	22,42	70	169

Sit-and-Reach-Test (SR), Fallstabtest (FT), Einbeinstand I und II (EBSI, EBSII) Change-of-Direction-Speed-Test (CDS), 30 m-Sprint-Test (Sprint), Jump-and-Reach-Test (JR), Standweitsprung (STJ), Medizinballstoßen (MS), 20 m-Shuttle-Run-Test (MSR).

Die durchschnittlich 108 gelaufenen Bahnen im Shuttle-Run-Test entsprachen einer geschätzten durchschnittlichen relativen maximalen Sauerstoffaufnahme von $57,31 \pm 6,19 \text{ ml kg}^{-1} \text{ min}^{-1}$ bei einer geschätzten $\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$ von $17,01 \pm 2,1 \text{ km h}^{-1}$. Bei Einschränkung der Stichprobe auf die Probanden der Hauptuntersuchung ($n = 13$) zeigte sich ein t -Test für verbundene Stichproben bei Vergleich der innerhalb der Laufbandspiroergometrie und dem Shuttle-Run-Test erhobenen relativen maximalen Sauerstoffaufnahme nicht signifikant ($t(12) = 0,455$, $p = 0,661$, $d = 0,166$).

Die Ergebnisse des Sit-and-Reach-Tests (SR), Fallstabtests (FT), Einbeinstand I (EBSI), 30 m-Sprint-Tests (Sprint), Jump-and-Reach-Tests (JR), Standweitsprungs (STJ) und 20 m-Shuttle-Run-Tests (MSR) wurden, falls möglich unter Berücksichtigung des Alters der Probanden, anhand von Normwerttabellen (s. Anhang A.3) bewertet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 17.7 dargestellt.

Tabelle 17.7: Ergebnisse der sportmotorischen Tests im Vergleich zur Norm.

Variable	<i>n</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	Min	Max
SR [cm]	21	3,14	1,06	1	4
FT [cm]	21	3,67	0,48	0	4
EBSI [Kontakte]	21	3,29	4,79	0	4
Sprint [s]	21	1,57	1,40	0	4
JR [cm]	21	2,24	0,77	1	3
STJ [cm]	21	2,05	1,07	0	4
$\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$ [$\text{ml kg}^{-1} \text{ min}^{-1}$]	19	3,94	0,23	3	4

4=ausgezeichnet, 3=überdurchschnittlich, 2=durchschnittlich, 1=unterdurchschnittlich, 0=schlecht.

Sit-and-Reach-Test (SR), Fallstabtest (FT), Einbeinstand I (EBSI), 30 m-Sprint-Test (Sprint), Jump-and-Reach-Test (JR), Standweitsprung (STJ), anhand der Ergebnisse des MSR geschätzte maximale Sauerstoffaufnahme ($\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$).

Der zurzeit mit Abstand beste und somit topgerankte deutsche Spieler erzielte herausragende Ergebnisse im FT (2 cm), im CDS (9,67 s), im Sprint (4,04 s), im MS (640 cm) und im MSR (137 Bahnen).

17.2.1 Motorische Fähigkeiten in Abhängigkeit des Spielniveaus

Es konnten statistisch signifikante starke Unterschiede zwischen den Spielern Squash national und Squash regional gefunden werden ($0,910 \leq d \leq 1,471$). So schnitten die Spieler Squash national in beiden Gleichgewichtstests (EBSI, EBSII), dem Agilitätstest (CDS), dem Sprinttest (Sprint) und dem 20 m-Shuttle-Run-Test (MSR) statistisch (hoch) signifikant erheblich besser ab als die Spieler Squash regional. Das statistische Trennungspotential zwischen den Spielniveaus hinsichtlich der beiden Koordinationstests

ist beim EBSI auf Grundlage einer größeren Effektstärke ($d = 1,411$ zu $d = 1,189$) und eines geringen p -Wertes als höher zu bewerten. Trotz fehlender statistischer Signifikanz schnitten die Probanden Squash national auch in dem Beweglichkeits- (SR), dem Reaktionsschnelligkeits- (FT) und den beiden Sprungtests (JR, STJ) deutlich besser ab als die Probanden Squash regional ($0,598 \leq d \leq 0,910$). Die Teststärke wurde für einen Effekt der Größe $0,598 \leq d \leq 0,910$ mit 36 – 62 % bewertet. Die Ergebnisse der Interferenzstatistik sind in Tabelle 17.8 aufgeführt.

Tabelle 17.8: Vergleich der Ergebnisse der sportmotorischen Testbatterie Squash national und Squash regional.

Variable	Squash national ($n = 13$)		Squash regional ($m = 8$)		t-Test/U-Test		
	M	SD	M	SD	t/z	df/U	p
SR [cm]	37,72	7,00	33,79	5,74	1,331	19	,199
FT [cm]	8,92	5,08	12,18	4,63	-1,471	19	,158
EBSI [Kontakte]	0,00	0,00	5,63	6,57	-3,140	19	,005
EBSII [s] ^a	27,37	4,89	20,88	6,84	-	-	-
	(26,09)	(7,26)	(23,44)	(9,44)	-2,342	4	,019
CDS [s] ^a	10,94	0,85	12,64	1,39	-3,273	17	,004
Sprint [s]	4,35	0,22	4,76	0,36	-3,266	19	,004
JR [cm]	50,73	8,13	43,75	6,82	2,025	19	,057
STJ [cm]	224,92	21,08	212,88	16,25	1,379	19	,184
MS [cm]	579,31	58,29	570,75	43,99	,356	19	,726
MSR [Bahnen] ^a	117,67	20,11	91,43	16,09	2,936	17	,009

^a: Auswertung über $n = 12$, $m = 7$.

Sit-and-Reach-Test (SR), Fallstabtest (FT), Einbeinstand I und II (EBSI, EBSII), Change-of-Direction-Speed-Test (CDS), 30 m-Sprint-Test (Sprint), Jump-and-Reach-Test (JR), Standweitsprung (STJ), Medizinballstoßen (MS), 20 m-Shuttle-Run-Test (MSR).

Die Bewertung der Leistungen innerhalb der einzelnen Tests im Vergleich zur Norm Squash national sind in Tabelle 17.9 abgebildet.

Tabelle 17.9: Ergebnisse der sportmotorischen Tests Squash national im Vergleich zur Norm.

Variable	<i>n</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	Min	Max
SR [cm]	13	3,23	0,93	1	4
FT [cm]	13	3,77	0,44	3	4
EBSI [Kontakte]	13	4,00	0,00	4	4
Sprint [s]	13	2,08	1,38	1	4
JR [cm]	13	2,23	0,73	1	3
STJ [cm]	13	2,23	1,01	0	4
$\dot{V}O_{2\max}$ [ml kg ⁻¹ min ⁻¹]	11	4,00	0,00	4	4

4=ausgezeichnet, 3=überdurchschnittlich, 2=durchschnittlich, 1=unterdurchschnittlich, 0=schlecht.

Sit-and-Reach-Test (SR), Fallstabtest (FT), Einbeinstand I (EBSI), 30 m-Sprint-Test (Sprint), Jump-and-Reach-Test (JR), Standweitsprung (STJ), anhand der Ergebnisse des MSR geschätzte maximale Sauerstoffaufnahme ($\dot{V}O_{2\max}$).

17.2.2 Motorische Fähigkeiten von Gewinnern und Verlierern

anhand der sowohl an der Haupt- als auch an der Nebenuntersuchung teilgenommenen Probanden konnte ein Vergleich der Fitness von Gewinnern ($n = 6$) und Verlierern ($m = 7$) vorgenommen werden. Bei gleichzeitiger Betrachtung beider Spielniveaus konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen Gewinnern und Verlierern festgestellt werden. Bei Eingrenzung der Stichprobe auf die Spieler Squash national konnte ein statistisch signifikanter starker Unterschied hinsichtlich der Agilität gefunden werden. So waren die Gewinner ($10,41 \pm 0,18$ s) im Change-of-Direction-Speed-Test systematisch um $\sim 1,5$ s schneller als die Verlierer ($11,82 \pm 0,49$ s, $t(3) = -3,786$, $p = 0,032$, $d = 3,456$).

17.3 Korrelationen körperliche Leistungsfähigkeit

Es konnten signifikante Korrelationen zwischen den Ergebnissen im Fallstabtest (FT), Einbeinstand (EBSII, Change-of-Direction-Speed-Test (CDS), Sprinttest (Sprint), Jump-and-Reach-Test JR) und Standweitsprung (STJ) sowie dem Ergebnissen im Sprinttest und im 20 m-Shuttle-Run-Test (MSR) festgestellt werden.

Tabelle 17.10: Korrelationen der Ergebnisse der Einzeltests innerhalb der sportmotorischen Testbatterie.

		FT	EBSII	CDS	Sprint	JR	STJ	MSR
FT	<i>r</i>	1	-,284	,543	,529	-,375	-,271	-,034
	<i>p</i>		,213	,016	,014	,094	,235	,890
EBSII	<i>r</i>	-,284	1	-,657	-,620	,480	,276	,380
	<i>p</i>	,238		,002	,005	,037	,252	,132
CDS	<i>r</i>	,543	-,657	1	-,706	-,700	-,596	-,395
	<i>p</i>	,016	,002		,001	,001	,007	,117
Sprint	<i>r</i>	,529	-,620	,706	1	-,649	-,367	-,566
	<i>p</i>	,014	,005	,001		,001	,102	,001
JR	<i>r</i>	-,375	,480	-,700	-,649	1	,617	,274
	<i>p</i>	,094	,037	,001	,001		,003	,257
STJ	<i>r</i>	-,271	,276	-,596	-,367	,617	1	,117
	<i>p</i>	,235	,252	,007	,102	,003		,633
MSR	<i>r</i>	-,034	,380	-,395	-,566	,274	,117	1
	<i>p</i>	,890	,132	,117	,012	,257	,633	

Fallstabtest (FT), Einbeinstand II (EBSII), Change-of-Direction-Speed-Test (CDS), 30 m-Sprint-Test (Sprint), Jump-and-Reach-Test (JR), Standweitsprung (STJ), 20 m-Shuttle-Run-Test (MSR).

18 Wirkungsgefüge Squash

Die erhobenen Daten zur Belastung, Beanspruchung und körperlichen Leistungsfähigkeit wurden basierend auf dem allgemeinen Wirkungsgefüge aus Kapitel 3.3 theoriegeleitet auf potentielle Zusammenhänge untereinander und insbesondere auf Zusammenhänge mit der Spielstärke der Probanden als Ausgangspunkt untersucht. Die Ergebnisse werden in den nachfolgenden Abschnitten dargestellt.

18.1 Spielstärke und Belastung

Die Untersuchung der erhobenen Belastungsparameter auf Korrelationen mit der Spielstärke der Spieler ergab gemessen an der Position im Expertenranking mit zunehmender Spielstärke eine (höchst) signifikante

- Abnahme der Anzahl kurzer Ballwechsel (VSR),
- Zunahme der Anzahl mittlerer und langer Ballwechsel (MR, LR),
- Zunahme der Anzahl der Schläge pro Ballwechsel/pro Satz (S, TS),
- Zunahme der Dauer der Ballwechsel (DR),
- Zunahme der Belastung-Pause-Relation (ERR),
- Zunahme der effektiven Spielzeit (EPT),
- Zunahme der Gesamtspielzeit (TPT),
- Zunahme der Schlagfrequenz (SF_{RPT} , SF_{TPT}),
- Zunahme der Anzahl der Volleyschläge und des prozentualen Anteils vorne geschlagener Bälle (Volley, FRONT),
- Zunahme der Aktionsrate der Beine (AR_{LERPT} , AR_{LETPT}),
- Zunahme der Anzahl und Aktionsrate von Aktionen maximaler Intensität (A_{max} , AR_{maxRPT} , AR_{maxTPT}),
- Zunahme des prozentualen Anteils an Sidesteps und Abnahme des prozentualen Anteils an Schritten (Steps) sowie die
- Zunahme der Nutzungsfrequenz und Nutzungsdauer der T-Zone (T erreicht, Standzeitpunkt T, Standzeit T, kum. Standzeit T, Standzeit T_{TPT}).

Die Ergebnisse der Korrelationsanalyse sind in Tabelle 18.1 dargestellt.

Tabelle 18.1: Ergebnisse der Korrelationsanalyse der Belastungs- und Aktivitätsparameter und dem Ranglistenplatz im Expertenranking ($n = 22$).

		VSR	MR	LR	S	DR	ERR	EPT	TPT	TS
Rang	r	,719	-,382	-,606	-,710	-,645	-,642	-,662	-,481	-,627
	p	,000	,079	,003	,000	,001	,001	,001	,024	,002
		SF _{NETTPT}	FRONT	Volley	AR _{LE_{TPT}}	AR _{TPT}	A _{max}	AR _{maxTPT}	Sidesteps	Steps
Rang	r	-,776	-,755	-,548	-,607	-,676	-,792	-,732	-,558	,622
	p	,000	,000	,004	,001	,000	,000	,000	,003	,001
		T erreicht	Standzeitpunkte T	Standzeit T	kum. Standzeit T	Standzeit T _{TPT}				
Rang	r	-,631	-,655	-,416	-,649	-,663				
	p	,001	,000	,027	,000	,000				

Anzahl sehr kurzer Ballwechsel (VSR), Anzahl mittellanger Ballwechsel (MR), Anzahl langer Ballwechsel (LR), Anzahl der Schläge pro Ballwechsel (S), Dauer der Ballwechsel (DR), Relation aus Belastung und Pause (ERR), effektive Spielzeit (EPT) Gesamtspielzeit (TPT), Anzahl der Schläge (TS), Schlagfrequenz in der Gesamtspielzeit (SF_{TPT}), Schläge vorne in Prozent der Netto-Gesamtschläge (FRONT), Volleys in Prozent der Netto-Gesamtschläge (Volley), Laufaktionen pro Minute der Gesamtspielzeit (AR_{TPT_{LE}}), Aktionen pro Minute der Gesamtspielzeit (AR_{TPT}), maximal intensive Aktionen pro Minute der Gesamtspielzeit (AR_{TPT_{max}}), prozentualer Anteil an Schritten (Steps) und Siesteps, Anzahl der rechtzeitigen T-Erreichungen (T erreicht), Anzahl der Standzeitpunkte auf dem T (Standzeitpunkte T), Standzeit auf dem T (Standzeit T), kumulierte Standzeit auf dem T (kum. Standzeit T), Standzeit auf dem T in Prozent der Gesamtspielzeit (StandzeitT_{TPT}).

Die Schlagfrequenz sowie die Laufaktionsrate wiesen auch bei Betrachtung dieser innerhalb der aktiven Spielzeit die dargestellten Korrelationen auf, jedoch mit einem geringeren Ausprägungsgrad ($-0,480 \leq r \leq -0,472$, $0,024 \leq p \leq 0,027$). Die Rate maximal intensiver Aktionen innerhalb der aktiven Spielzeit war ebenfalls positiv mit der Spielstärke und somit negativ mit dem Ranglistenplatz innerhalb des Expertenrankings korreliert ($r = -0,393$, $p = 0,035$). Auch bei partieller Korrelationsanalyse mit Kontrolle des Einflusses der Gesamtspielzeit auf die absolut gemessenen Belastungsparameter blieben die in Tabelle 18.1 dargestellten Korrelationen prinzipiell erhalten.

18.1.1 Haupteinflüsse

Durch schrittweise multiple Regressionsanalyse konnte das in Tabelle 18.2 dargestellte Modell als am besten erklärend bestimmt werden.

Tabelle 18.2: Lineare Modellfunktion zur Erklärung der Abhängigkeit der Position im Expertenranking von den Belastungsparametern.

		Modell				
AV		<i>b</i>	<i>s</i>	β	<i>t</i>	<i>p</i>
Rang	(Konstante)	180,231	28,636		6,294	,000
	AR _{LERPT}	-,538	,147	-,488	-3,652	,002
	SF _{RPT}	-2,802	,591	-,626	-4,742	,000
	Standzeit T	-34,750	11,258	-,413	-3,087	,006

Position im Expertenranking (Rang), Laufaktionen pro Minute der aktiven Spielzeit (AR_{LERPT}), Schlagfrequenz in der aktiven Spielzeit (SF_{RPT}) und Standzeit auf dem T (Standzeit T) .

Durch das statistisch hoch signifikante Modell ($F(3; 18) = 14,083$, $p = 0,000$) konnten 65,1 % der Varianz erklärt werden.

18.2 Belastung und metabolische Leistung

Für die Belastungs- und Aktivitätsparameter wurden zunächst bivariate ($n = 22$) und anschließend auf Grund der Ergebnisse aus Kapitel 18.1 und einer nachgewiesenen signifikanten Korrelation von Spielstärke (Rang) und metabolischer Leistung (P_{TOT} , $r = -0,485$, $p = 0,022$) partielle Korrelationen unter Kontrolle des Einflusses der Spielstärke ($df = 19$) mit der metabolischen Leistung berechnet. Bei Untersuchung der zeitlichen Belastungsparameter ohne Berücksichtigung eines möglichen Einflusses durch die Spielstärke konnten statistisch signifikante deutliche positive Korrelationen von P_{TOT} und der Belastung-Pause-Relation (ERR, $r = 0,427$, $p = 0,048$), der effektiven Spielzeit (EPT, $r = 0,437$, $p = 0,042$) und der Schlagfrequenz in der Gesamtspielzeit (SF_{TPT}, $r = 0,461$, $p = 0,031$) nachgewiesen werden. Ebenfalls ohne Berücksichtigung des Einflusses der Spielstärke zeigte sich P_{TOT} statistisch (marginal) signifikant deutlich positiv mit den Laufaktionsraten (AR_{LERPT}, $r = 0,624$, $p = 0,002$; AR_{LETPT}, $r = 0,568$, $p = 0,006$), den Gesamaktionsraten (AR_{RPT}, $r = 0,538$, $p = 0,010$; AR_{TPT}, $r = 0,556$, $p = 0,007$) sowie mit der Anzahl maximal intensiver Aktionen (A_{max} , $r = 0,387$, $p = 0,074$) korreliert.

Bei Kontrolle des Einflusses der Spielstärke konnte lediglich für AR_{LERPT} und AR_{LETPT} statistisch signifikante starke positive Korrelationen mit P_{TOT} nachgewiesen werden ($r = 0,511$, $p = 0,018$; $r = 0,510$, $p = 0,018$).

Im Kontext von Beanspruchungsregulation konnte unter Kontrolle des Einflusses der Spielstärke eine statistisch signifikante deutliche negative Korrelation zwischen der Standzeit auf dem T (Standzeit T) und P_{TOT} nachgewiesen werden ($r = -0,404$, $p = 0,038$).

18.2.1 Haupteinflüsse

Durch schrittweise multiple Regressionsanalyse konnte das in Tabelle 19.4 dargestellte Modell als die metabolische Leistung am besten erklärend bestimmt werden.

Tabelle 18.3: Lineare Modellfunktion zur Erklärung der Abhängigkeit der metabolischen Leistung von Belastungsparametern.

		Modell				
AV		<i>b</i>	<i>s</i>	β	<i>t</i>	<i>p</i>
P_{TOT}	(Konstante)	-,035	4,305		-,008	,994
	$AR_{LE_{RPT}}$,235	,066	,624	3,572	,002

Metabolische Leistung (P_{TOT}), Laufaktionen pro Minute der aktiven Spielzeit ($AR_{LE_{RPT}}$).

Durch das hoch signifikante Modell ($F(1;20) = 12,762$, $p = 0,002$) konnten 35,9 % der Varianz erklärt werden. Abbildung 18.2.1 visualisiert den deutlichen linearen Zusammenhang von $AR_{LE_{RPT}}$ und P_{TOT} .

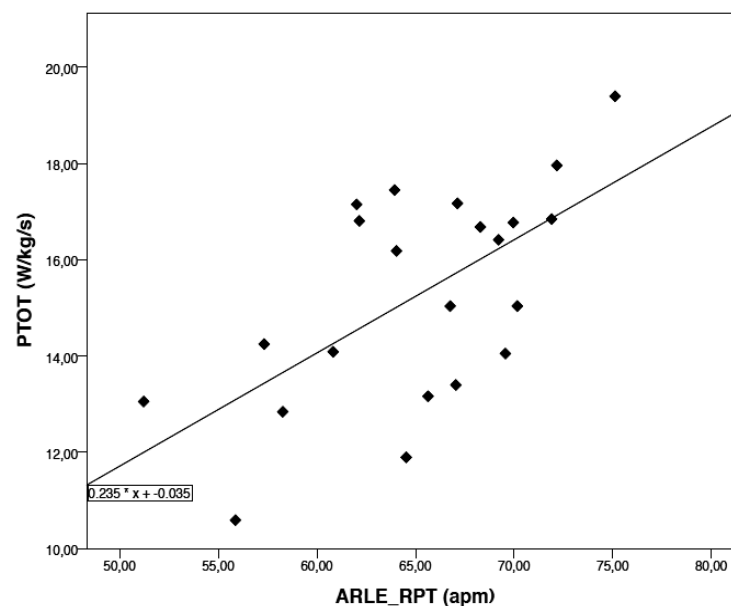


Abbildung 18.2.1: Zusammenhang zwischen der durchschnittlichen Rate an Laufaktionen pro Minute der aktiven Spielzeit ($AR_{LE_{RPT}}$) und der durchschnittlichen metabolischen Leistung (P_{TOT}).

18.3 Metabolische Leistung und physische Ausbelastung

Es konnten keine signifikanten Zusammenhänge zwischen der metabolischen Leistung und den Parametern der physischen Ausbelastung nachgewiesen werden ($-0,129 \leq r \leq -0,039$, $0,579 \leq p \leq 0,867$).

18.4 Körperliche Leistungsfähigkeit und physische Ausbelastung

18.4.1 Hauptuntersuchung

Die Parameter der physischen Ausbelastung ($\% \dot{V}O_{2\max}$, $\% \dot{V}O_{BLC4}$, $\%HR_{\max}$, $\%HR_{BLC4}$) wurden auf Korrelationen mit der aeroben Leistungsfähigkeit ($rel\dot{V}O_{2\max}$, $rel\dot{V}O_{BLC4}$) untersucht. Es konnten (höchst) signifikante starke Korrelationen zwischen der physischen Ausbelastung und der aeroben Leistungsfähigkeit nachgewiesen werden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 18.4 dargestellt.

Tabelle 18.4: Ergebnisse der Korrelationsanalyse zwischen den Parametern der physischen Ausbelastung und der aeroben Leistungsfähigkeit ($n = 21$).

		$\% \dot{V}O_{2\max}$	$\% \dot{V}O_{BLC4}$	$\%HR_{\max}$	$\%HR_{BLC4}$
$rel\dot{V}O_{2\max}$	r	-,263	-,563	-,577	-,797
	p	,249	,008	,006	,000
$rel\dot{V}O_{BLC4}$	r	-,209	-,594	-,609	-,829
	p	,363	,004	,003	,000

Relative maximale Sauerstoffaufnahme ($rel\dot{V}O_{2\max}$), relative Sauerstoffaufnahme bei 4 mmol l⁻¹ Blutlaktat ($\dot{V}O_{BLC4}$), durchschnittliche Sauerstoffaufnahme in Prozent der maximalen Sauerstoffaufnahme ($\% \dot{V}O_{2\max}$), durchschnittliche Sauerstoffaufnahme in Prozent der Sauerstoffaufnahme bei 4 mmol l⁻¹ Blutlaktat ($\% \dot{V}O_{BLC4}$), durchschnittliche Herzfrequenz in Prozent der maximalen Herzfrequenz ($\%HR_{\max}$), durchschnittliche Herzfrequenz in Prozent der Herzfrequenz bei 4 mmol l⁻¹ Blutlaktat ($\%HR_{BLC4}$).

18.5 Belastung und physische Ausbelastung

Per bivariater Korrelationsanalyse ($n = 21$) konnte eine statistisch signifikante deutliche negative Korrelation zwischen der Standzeit auf dem T (Standzeit T) und der durchschnittlichen Sauerstoffaufnahme sowie der durchschnittlichen Herzfrequenz in Relation zum Maximum nachgewiesen werden ($\% \dot{V}O_{2\max}$, $r = -0,404$, $p = 0,036$; $\% \dot{V}O_{BLC4}$, $r = -0,433$, $p = 0,050$). Bei weiterer Analyse der übrigen bivariat korrelierten Parameter des Belastungsprofils auf Korrelationen mit den Parametern der physischen Ausbelastung zeigten sich unter Kontrolle des Einflusses der aeroben Leistungsfähigkeit ($rel\dot{V}O_{BLC4}$, $df = 18$) statistisch (höchst) signifikante starke positive Korrelationen zwischen der Anzahl maximal intensiver Aktionen (A_{\max} , $r = 0,513$, $p = 0,013$) sowie der Rate dieser pro Minute der aktiven Spielzeit ($AR_{\max RPT}$, $r = 0,740$, $p = 0,000$) und pro Minute der Gesamtspielzeit ($AR_{\max TPT}$, $r = 0,669$, $p = 0,001$) mit $\% \dot{V}O_{BLC4}$.

18.6 Haupteinflüsse auf die physische Ausbelastung

Per multipler Regressionsanalyse mit schrittweiser Elimination wurden die Variablen der physischen Ausbelastung auf ihre Haupteinflüsse aus Belastung, metabolischer Leistung und aerober Leistungsfähigkeit untersucht. Die Ergebnisse sind in Tabelle 18.5 dargestellt.

Tabelle 18.5: Lineare Modellfunktionen zur Erklärung der Abhängigkeit der physischen Ausbelastung von den Belastungsparametern, der metabolischen Leistung sowie den Parametern der aeroben Leistungsfähigkeit.

		Modell				
AV		<i>b</i>	<i>s</i>	β	<i>t</i>	<i>p</i>
% $\dot{V}O_{2\max}$	(Konstante)	75,378	3,981		18,936	,000
	P _{TOT}	3,843	,287	1,192	13,369	,000
	rel $\dot{V}O_{2\max}$	-,993	,087	-1,021	-11,457	,000
% $\dot{V}O_{2BLC4}$	(Konstante)	102,372	3,884		26,356	,000
	rel $\dot{V}O_{2BLC4}$	-2,133	,101	-1,337	-21,012	,000
	P _{TOT}	5,543	,307	,990	18,063	,000
	DR	,591	,161	,197	3,680	,002
%HR _{max}	(Konstante)	99,526	3,037		32,767	,000
	rel $\dot{V}O_{2\max}$	-,339	,061	-,707	-5,546	,000
	AR _{maxRPT}	1,081	,232	,595	4,666	,000
%HR _{BLC4}	(Konstante)	157,721	7,931		19,131	,000
	rel $\dot{V}O_{2BLC4}$	-1,084	,168	-,829	-6,456	,000

Durchschnittliche Sauerstoffaufnahme in Prozent der maximalen Sauerstoffaufnahme (% $\dot{V}O_{2\max}$), metabolische Leistung (P_{TOT}) und relative maximale Sauerstoffaufnahme (rel $\dot{V}O_{2\max}$).

Alle Modelle waren höchst signifikant ($F(2; 18) = 96,695$, $p = 0,000$; $F(3; 17) = 178,354$, $p = 0,000$; $F(1; 19) = 41,477$, $p = 0,000$; $F(2; 18) = 105,350$, $p = 0,000$). Durch das erste Modell (% $\dot{V}O_{2\max}$) konnten 90,5 %, durch das zweite Modell (% $\dot{V}O_{2\max}$) 96,4 %, durch das dritte Modell (%HR_{max}) 68,4 % und durch das vierte Modell (%HR_{BLC4}) 67,0 % der Varianz erklärt werden. Bei zusätzlicher Berücksichtigung der Spielstärke als unabhängige Variable ergaben sich die identischen Modelle.

18.7 Spielstärke und physische Ausbelastung

Es konnten keine signifikanten Zusammenhänge zwischen der Position im Experten-ranking und den Parametern der physischen Ausbelastung gefunden werden. Vor dem Hintergrund der Abhängigkeit der physischen Ausbelastung von der metaboli-

schen Leistung und der aeroben Leistungsfähigkeit wurden diese auf ihren Einfluss auf die Spielstärke analysiert. Dabei zeigte die relative maximale Sauerstoffaufnahme den größten Beitrag zur Varianzerklärung (s. Kapitel 18.9.1).

18.8 Körperliche Leistungsfähigkeit und metabolische Leistung

18.8.1 Hauptuntersuchung

Es konnte ein hoch signifikanter, starker positiver linearer Zusammenhang zwischen der aeroben Leistungsfähigkeit und der durchschnittlichen metabolischen Leistung (P_{TOT}) nachgewiesen werden ($\text{rel}\dot{V}O_{2\max}$, $F(1; 19) = 12,906$, $p = 0,002$, $\beta = 0,636$, $R^2 = 0,373$; $\text{rel}\dot{V}O_{2\text{BLC}4}$, $F(1; 20) = 12,927$, $p = 0,002$, $\beta = 0,627$, $R^2 = 0,362$). Abbildung 18.8.1 zeigt den linearen Zusammenhang zwischen $\text{rel}\dot{V}O_{2\max}$ und P_{TOT} .

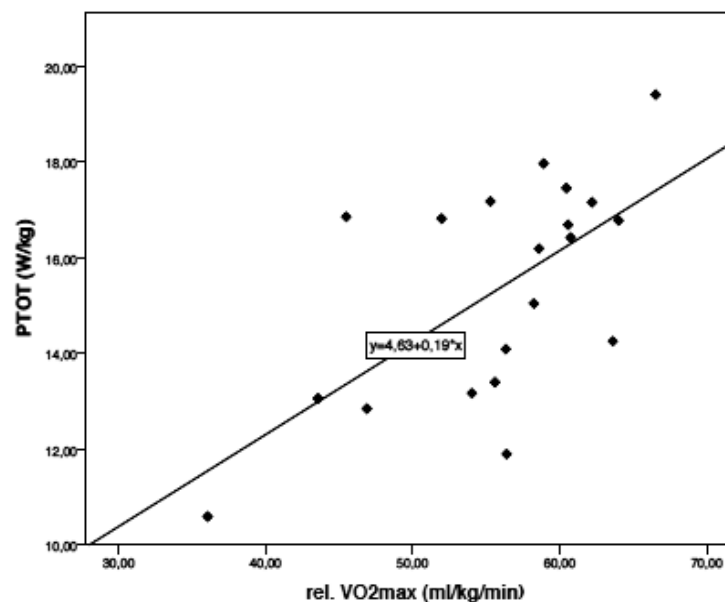


Abbildung 18.8.1: Zusammenhang zwischen der relativen maximalen Sauerstoffaufnahme und der durchschnittlichen metabolischen Leistung (P_{TOT}).

Abbildung 18.8.2 zeigt den linearen Zusammenhang zwischen $\text{rel}\dot{V}O_{2\text{BLC}4}$ und P_{TOT} .

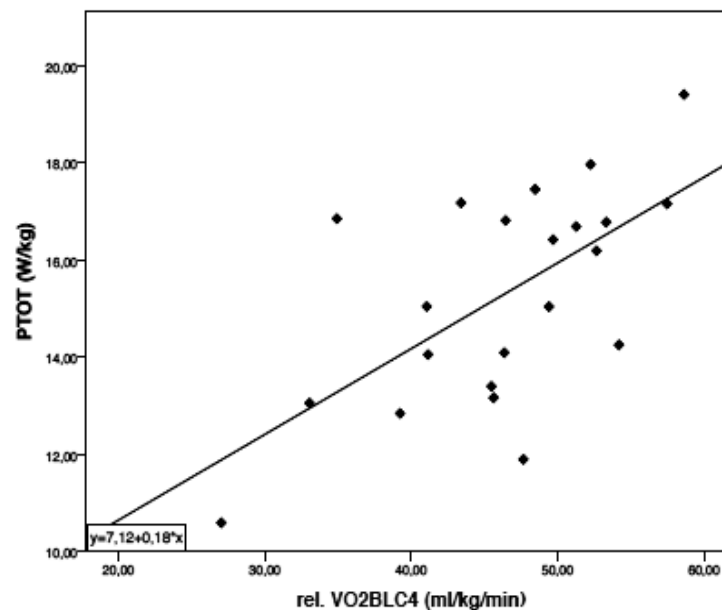


Abbildung 18.8.2: Zusammenhang zwischen der Sauerstoffaufnahme bei einer Blutlaktatkonzentration von 4 mmol l^{-1} ($\text{rel}\dot{V}\text{O}_{2\text{BLC4}}$) und der durchschnittlichen metabolischen Leistung (P_{TOT}).

Bei schrittweiser multipler Regressionsanalyse zeigte $\text{rel}\dot{V}\text{O}_{2\text{BLC4}}$ diesbezüglich den höchsten Beitrag zur Varianzerklärung.

18.8.2 Nebenuntersuchung

Unter Kontrolle des Einflusses der Spielstärke ($df = 12$) konnten keine signifikanten Korrelationen zwischen der Leistung in den einzelnen sportmotorischen Tests und der durchschnittlichen metabolischen Leistung nachgewiesen werden. Allerdings zeigte sich ebenfalls unter Kontrolle des Einflusses der Spielstärke ($df = 12$) eine statistisch signifikante starke negative Korrelation zwischen der Anzahl der Fehler im EBSI und der Anzahl an Laufaktionen pro Minute der aktiven Spielzeit (AR_{LERPT} , $r = -0,750$, $p = 0,012$). Analog zeigte sich die Standzeit im EBSII statistisch signifikant stark positiv mit AR_{LERPT} korreliert ($r = 0,598$, $p = 0,040$).

18.9 Spielstärke und körperliche Leistungsfähigkeit

18.9.1 Hauptuntersuchung

Es konnte ein höchst signifikanter starker negativer linearer Zusammenhang zwischen der Position im Expertenranking und der relativen maximalen Sauerstoffaufnahme ($\text{rel}\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$) gefunden werden ($F(1;19) = 26,445$, $p = 0,000$, $\beta = -0,763$, $R^2 = 0,560$). Abbildung 18.9.1 visualisiert den linearen Zusammenhang zwischen der Spielstärke ausgedrückt durch die Position im Expertenranking und der relativen maximalen Sauerstoffaufnahme.

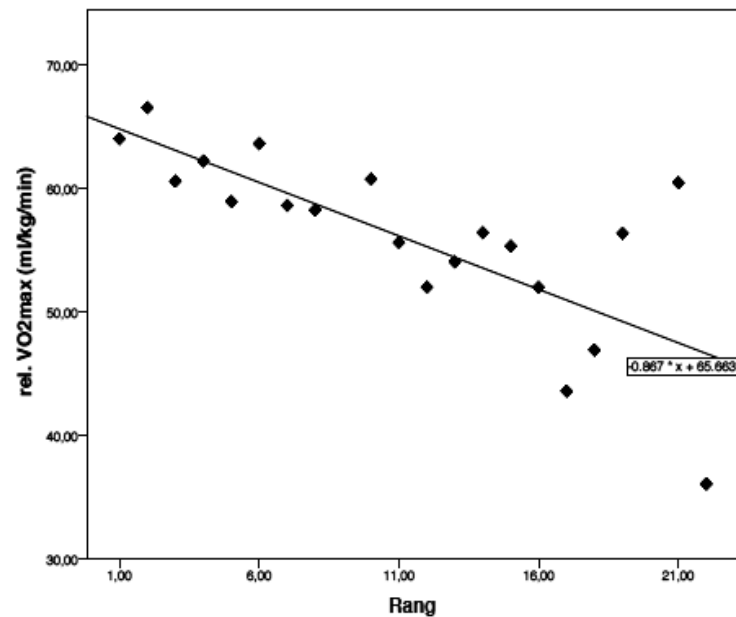


Abbildung 18.9.1: Zusammenhang zwischen der Position im Expertenranking (Rang) und der relativen maximalen Sauerstoffaufnahme der Probanden im Laufbandstufentest ($\text{rel}\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$).

Für die Sauerstoffaufnahme an der fixen anaeroben Schwelle ($\text{rel}\dot{V}\text{O}_{2\text{BLC4}}$) konnte ebenfalls ein höchst signifikanter starker negativer linearer Zusammenhang mit dem Ranglistenplatz im Expertenranking nachgewiesen werden ($F(1;20) = 30,635$, $p = 0,000$, $\beta = -0,778$, $R^2 = 0,585$). Bei schrittweise multipler Regressionsanalyse zeigte $\text{rel}\dot{V}\text{O}_{2\text{BLC4}}$ erneut den höchsten Beitrag zur Varianzerklärung. Abbildung 18.9.2 visualisiert den linearen Zusammenhang zwischen der Spielstärke ausgedrückt durch die Position im Expertenranking (Rang) und der relativen Sauerstoffaufnahme an der fixen anaeroben Schwelle.

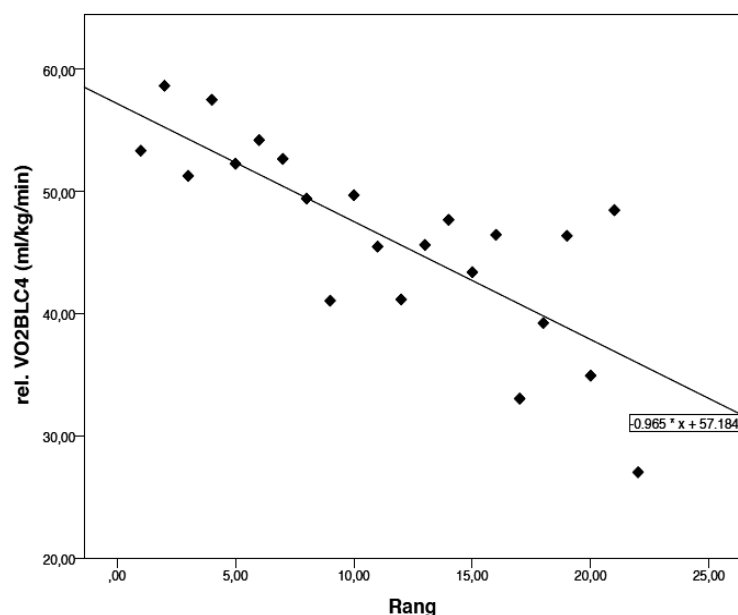


Abbildung 18.9.2: Zusammenhang zwischen der Position im Expertenranking (Rang) und der relativen Sauerstoffaufnahme der Probanden im Laufbandstufentest bei 4 mmol l^{-1} Blutlaktat ($\text{relVO}_{2\text{BLC4}}$).

$\text{relVO}_{2\text{max}}$ und $\text{relVO}_{2\text{BLC4}}$ waren statistisch signifikant stark positiv ($r_{\text{min}} = 0,500$, $p_{\text{max}} = 0,029$), die Position im Expertenranking statistisch signifikant stark negativ mit dem Trainingspensum korreliert ($r = -0,570$, $p = 0,011$).

18.9.2 Nebenuntersuchung

Die Untersuchung von Zusammenhängen zwischen den Ergebnissen in den einzelnen sportmotorischen Tests und dem Expertenranking zeigte mit zunehmender Spielstärke eine (hoch) signifikante starke Verbesserung im Fallstabtest (FT), Einbeinstand I und II (EBSI, EBSII), Change-of-Direction-Speed-Test (CDS), 30 m-Sprinttest (Sprint), Jump-and-R Reach-Test (JR) und 20 m-Shuttle-Run-Test (MRS) sowie eine signifikante deutliche Verbesserung im Standweitsprung (STJ). Lediglich für die Ergebnisse im Medizinballstoßtest (MS) konnte kein signifikanter Zusammenhang mit der Spielstärke nachgewiesen werden. Tabelle 18.6 enthält die Ergebnisse der Korrelationsanalyse.

Tabelle 18.6: Korrelationen zwischen der Position im Expertenranking und den Ergebnissen innerhalb der sportmotorischen Tests ($n = 21$).

		FT	EBSI	EBSII ^a	CDS ^a	Sprint	JR	STJ	MSR ^a
Rang	r	,560	,565	-,519	,685	,677	-,547	-,444	-,649
	p	,008	,008	,023	,001	,001	,010	,044	,003

^a: Auswertung über $n = 19$.

Position im Expertenranking (Rang), Fallstabtest (FT), Einbeinstand I und II (EBSI, EBSII) Change-of-Direction-Speed-Test (CDS), 30 m-Sprint-Test (Sprint), Jump-and-R Reach-Test (JR), Standweitsprung (STJ), 20 m-Shuttle-Run-Test (MSR).

Per schrittweiser multipler Regression konnte festgestellt werden, dass die Spielstärke sich am besten durch die Leistung innerhalb des 20 m-Shuttle-Run- und Fallstabtests vorhersagen lässt ($F(14;2) = 22,446$, $p = 0,001$, $R^2 = 0,575$). Die Kennzahlen des Modells sind in Tabelle 18.7 aufgeführt.

Tabelle 18.7: Lineares Modell zur Erklärung der Abhängigkeit der Spielstärke von einzelnen motorischen Fähigkeiten.

		Modell				
AV		b	s	β	t	p
	(Konstante)	24,414	6,433		3,951	,001
Rang	MSR	-,189	,051	-,610	-3,728	,002
	FT	,690	,246	,458	2,801	,014

Position im Expertenranking (Rang), 20 m-Shuttle-Run-Test (MSR), Fallstabtest (FT).

Die Ergebnisse des Fallstabtests wurden daraufhin unter Kontrolle des Einflusses der Spielstärke auf potentielle Zusammenhänge mit den Aktivitätsparametern untersucht. Es zeigte sich eine marginal signifikante starke positive Korrelation von FT mit der Anzahl maximal intensiver Aktionen pro Minute der Gesamtspielzeit ($AR_{\max_{TPT}}$, $r = 0,539$, $p = 0,087$). Insbesondere war FT statistisch hoch signifikant stark positiv mit der Anzahl harter Richtungswechsel korreliert ($r = 0,741$, $p = 0,009$).

19 Einflüsse auf die anteilige Energiebereitstellung

19.1 Belastung

Auf Grund der in Kapitel 18.1 nachgewiesenen Korrelationen von Belastung und Spielstärke wurden partielle Korrelationsanalysen unter Kontrolle des Einflusses der Spielstärke durchgeführt, um Zusammenhänge zwischen der Belastung und Energiebereitstellung zu identifizieren. Es konnten statistisch signifikante starke Korrelationen zwischen der Dauer der Ballwechsel (DR), der Gesamtspielzeit (TPT), der effektiven Spielzeit (EPT), der Relation aus Belastung und Pause (ERR), dem prozentualen Anteil vorne geschlagener Bälle (FRONT), von Sidesteps und Schritten (Steps) und der Anzahl der rechtzeitigen T-Erreichungen (T erreicht) mit der anteiligen Energiebereitstellung (%W_{AER}, %W_{PCr}, %W_{BLC}) nachgewiesen werden. Die Ergebnisse der partiellen Korrelationsanalyse sind in Tabelle 19.1 aufgeführt.

Tabelle 19.1: Korrelationen zwischen der anteiligen Energiebereitstellung und der Belastung unter Kontrolle des Einflusses der Spielstärke ($df = 19$).

		%W _{AER}	%W _{PCr}	%W _{BLC}			%W _{AER}	%W _{PCr}	%W _{BLC}
TPT	<i>r</i>	,676	-,710	-,377	FRONT	<i>r</i>	-,635	,656	,371
	<i>p</i>	,001	,000	,092		<i>p</i>	,002	,001	,097
DR	<i>r</i>	,456	-,438	-,317	Sidesteps	<i>r</i>	,464	-,524	-,079
	<i>p</i>	,038	,047	,162		<i>p</i>	,040	,018	,740
EPT	<i>r</i>	,448	-,324	-,479	Steps	<i>r</i>	-,460	,539	,072
	<i>p</i>	,042	,152	,028		<i>p</i>	,038	,016	,762
ERR	<i>r</i>	,426	-,305	-,460	T erreicht	<i>r</i>	,548	-,531	-,374
	<i>p</i>	,054	,179	,036		<i>p</i>	,010	,013	,095

Gesamtspielzeit (TPT), Dauer der Ballwechsel (DR), effektive Spielzeit (EPT), Belastung-Pause-Relation (ERR), Schläge vorne in Prozent der Netto-Gesamtschläge (FRONT), Sidesteps in Prozent der Laufaktionen (Sidesteps), Schritte in Prozent der Laufaktionen (Steps), Anzahl der rechtzeitigen T-Erreichungen (T erreicht), relativ zur Gesamtenergiemenge (W_{TOT}) aerob (%W_{AER}), anaerob alaktazid (%W_{PCr}) und anaerob laktazid bereitgestellte Energiemenge (%W_{BLC}).

19.1.1 Haupteinflüsse

Per anschließender multipler Regression mit schrittweiser Elimination zeigte sich die Art der Energiebereitstellung wesentlich von der Gesamtspielzeit (TPT), dem prozentualen Anteil der Schritte (Steps) und die effektive Spielzeit (EPT) abhängig.

Die Parameter der Modellfunktionen mit dem höchsten Beitrag zur Varianzerklärung sind in Tabelle 19.2 aufgeführt.

Tabelle 19.2: Lineare Modellfunktion zur Erklärung der Abhängigkeit der Beteiligung des aeroben Energiestoffwechsels von Belastungsparametern.

		Modell				
AV		<i>b</i>	<i>s</i>	β	<i>t</i>	<i>p</i>
%W _{AER}	(Konstante)	87,244	4,004		21,792	,000
	TPT	,020	,005	,582	3,792	,001
	Steps	-,116	,051	-,350	-2,284	,034
%W _{PCr}	(Konstante)	9,949	2,552		3,899	,001
	TPT	-,014	,003	-,598	-4,179	,001
	Steps	,082	,032	-,364	-2,544	,020
%W _{BLC}	(Konstante)	8,280	1,652		5,252	,000
	EPT	-,109	,028	-,665	-3,978	,001

Relativ zur Gesamtenergiemenge (W_{TOT}) aerob (%W_{AER}) bereitgestellte Energiemenge, Gesamtspielzeit (TPT), Schritte in Prozent der Laufaktionen (Steps), effektive Spielzeit (EPT).

Durch die höchst signifikanten Modelle ($F(2;19) = 19,510$, $p = 0,000$; $F(2;19) = 23,864$, $p = 0,000$; $F(1;20) = 17,694$, $p = 0,000$) konnten 63,8 %, 68,5 % bzw. 41,4 % der Varianz erklärt werden.

Eine Untersuchung des Ausmaßes der Abhängigkeit zwischen der Sitzdauer in den Satzpausen und der Energiebereitstellung zeigte eine statistisch signifikante starke positive Korrelationen zwischen der Dauer der Sitzphase und sowohl der absolut (W_{PCr} , $r = 0,503$, $p = 0,009$) als auch anteilig berechneten (% W_{PCr} , $r = 0,675$, $p = 0,001$) anaerob alaktazid bereitgestellten Energiemenge.

19.2 Physische Ausbelastung

Eine partielle Korrelationsanalyse unter Kontrolle des Einflusses der Spielstärke zeigte (höchst) signifikante deutliche bis starke Korrelationen zwischen der kardialen Ausbelastung (%HR_{max}, %HR_{BLC4}) und der anteiligen Energiebereitstellung (%W_{AER}, %W_{PCr}, %W_{BLC}). Die Ergebnisse der Korrelationsanalyse sind in Tabelle 19.3 dargestellt.

Tabelle 19.3: Ergebnisse der partiellen Korrelationsanalyse zwischen den Parametern der physischen Ausbelastung und der anteiligen Energiebereitstellung ($df = 19$).

		%W _{AER}	%W _{PCr}	%W _{BLC}
%VO _{2max}	<i>r</i>	-,114	,157	,015
	<i>p</i>	,632	,510	,952
%VO _{BLC4}	<i>r</i>	-,286	,256	,228
	<i>p</i>	,209	,262	,321
%HR _{max}	<i>r</i>	-,480	,322	,559
	<i>p</i>	,032	,166	,010
%HR _{BLC4}	<i>r</i>	-,647	,378	,834
	<i>p</i>	,002	,100	,000

Durchschnittliche Sauerstoffaufnahme in Prozent der maximalen Sauerstoffaufnahme (%VO_{2max}), durchschnittliche Sauerstoffaufnahme in Prozent der Sauerstoffaufnahme bei 4 mmol l⁻¹ Blutlaktat (%VO_{BLC4}), durchschnittliche Herzfrequenz in Prozent der maximalen Herzfrequenz (%HR_{max}), durchschnittliche Herzfrequenz in Prozent der Herzfrequenz bei 4 mmol l⁻¹ Blutlaktat (%HR_{BLC4}), relativ zur Gesamtenergiemenge (W_{TOT}) aerob (%W_{AER}), anaerob alaktazid (%W_{PCr}) und anaerob laktazid bereitgestellte Energiemenge (%W_{BLC}).

Für %HR_{max} konnte eine hoch signifikante positive Korrelation mit der Rate maximal intensiver Aktionen insbesondere innerhalb der aktiven Spielzeit ($r = 0,771$, $p = 0,000$, $df = 19$) sowie eine signifikante positive Korrelation mit dem prozentualen Anteil vorne gespielter Bälle nachgewiesen werden ($r = 0,450$, $p = 0,041$, $df = 19$).

19.3 Haupteinflüsse Belastung und physische Ausbelastung

Per anschließender multipler Regression mit schrittweiser Elimination zeigte sich die Art der Energiebereitstellung wesentlich von der durchschnittlichen Sauerstoffaufnahme in Prozent der maximalen Sauerstoffaufnahme, der durchschnittlichen Herzfrequenz in Relation zur anaeroben Schwellenherzfrequenz (%HR_{BLC4}), der Gesamtspielzeit (TPT), der Belastung-Pause-Relation (ERR) und der Anzahl der Schritte in Prozent der Laufaktionen (Steps) abhängig. Die Parameter der Modellfunktionen mit dem höchsten Beitrag zur Varianzerklärung sind in Tabelle 19.4 aufgeführt.

Tabelle 19.4: Lineare Modellfunktion zur Erklärung der Abhängigkeit der Beteiligung des aeroben Energiestoffwechsels von Belastungsparametern.

		Modell				
AV		<i>b</i>	<i>s</i>	β	<i>t</i>	<i>p</i>
%W _{AER}	(Konstante)	100,40	4,737		21,197	,000
	%HF _{BLC4}	-,175	,037	-,544	-4,716	,000
	TPT	,018	,004	,511	4,436	,000
%W _{PCr}	(Konstante)	10,050	2,640		3,806	,001
	TPT	-,014	,003	-,607	-4,079	,001
	Steps	,080	,034	,347	2,334	,031
%W _{BLC}	(Konstante)	-6,812	1,601		-4,255	,000
	%HR _{BLC4}	,100	,013	,746	7,500	,000
	ERR	-1,066	,346	-,307	-3,092	,006

Relativ zur Gesamtenergiemenge (W_{TOT}) aerob (%W_{AER}) anaerob alaktazid (%W_{PCr}) und anaerob laktazid (%W_{BLC}) bereitgestellte Energiemenge, durchschnittliche Herzfrequenz in Prozent der Herzfrequenz bei 4 mmol l⁻¹ Blutlaktat (%HR_{BLC4}), Gesamtspielzeit (TPT), Schritte in Prozent der Laufaktionen (Steps), Belastung-Pause-Relation (ERR) und durchschnittliche Sauerstoffaufnahme in Prozent der maximalen Sauerstoffaufnahme (%VO_{2max}).

Alle Modelle waren höchst signifikant ($F(2;18) = 38,614$, $p = 0,000$; $F(2;18) = 21,223$, $p = 0,000$; $F(2;18) = 54,929$, $p = 0,000$). Durch das erste Modell (%W_{AER}) konnten 79,0 %, durch das zweite Modell (%W_{PCr}) 66,9 % und durch das dritte Modell (%W_{BLC}) 84,4 % der Varianz erklärt werden. Bei zusätzlicher Berücksichtigung der Spielstärke als unabhängige Variable ergaben sich die identischen Modelle.

19.4 Körperliche Leistungsfähigkeit

19.4.1 Hauptuntersuchung

Die Korrelationsanalyse zeigte unter Kontrolle des Einflusses der Spielstärke eine Zunahme der aeroben Energiebereitstellung und eine Abnahme der anaerob laktaziden Energiebereitstellung mit steigender aerober Leistungsfähigkeit. Die Ergebnisse der Korrelationsanalyse sind in Tabelle 19.5 dargestellt.

Tabelle 19.5: Ergebnisse der partiellen Korrelationsanalyse zwischen der aeroben Leistungsfähigkeit und der anteiligen Energiebereitstellung ($df = 19$).

		%W _{AER}	%W _{PCr}	%W _{BLC}
rel $\dot{V}O_{2\max}$	r	,441	-,302	-,498
	p	,045	,183	,021
rel $\dot{V}O_{BLC4}$	r	,549	-,348	-,664
	p	,010	,122	,001

Relative maximale Sauerstoffaufnahme (rel $\dot{V}O_{2\max}$), relative Sauerstoffaufnahme bei 4 mmol l⁻¹ Blutlaktat (rel $\dot{V}O_{2BLC4}$), relativ zur Gesamtenergiemenge (W_{TOT}) aerob (%W_{AER}), anaerob alaktazid (%W_{PCr}) und anaerob laktazid bereitgestellte Energiemenge (%W_{BLC}).

19.4.2 Nebenuntersuchung

Auch die Ergebnisse der sportmotorischen Tests wurden unter Kontrolle des Einflusses der Spielstärke auf Zusammenhänge mit der anteiligen Energiebereitstellung untersucht. Für die Weite beim Medizinballstoßen konnte eine signifikante negative Korrelation mit dem Anteil des aeroben Energiestoffwechsels an der Energiebereitstellung nachgewiesen werden ($df = 9$, $r = -0,736$, $p = 0,037$).

20 Einflussgröße Alter

20.1 Alter und Spielstärke

20.1.1 Hauptuntersuchung

Um zu überprüfen, ob das Alter der Probanden als anthropometrisches Charakteristikum der beiden Subjektgruppen (s. Kapitel 14.1.1) die Studienergebnisse beeinflusst und somit bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden muss, wurde die Existenz potentieller Korrelationen des Alters mit der Spielstärke untersucht. Es konnte ein höchst signifikanter positiver starker linearer Zusammenhang zwischen dem Alter und der Position im Expertenranking festgestellt werden ($F(1;20) = 22,277$, $p = 0,000$, $\beta = 0,726$, $R^2 = 0,504$). Die Abhängigkeit der Position im Expertenranking vom Alter ist in Abbildung 20.1.1 dargestellt.

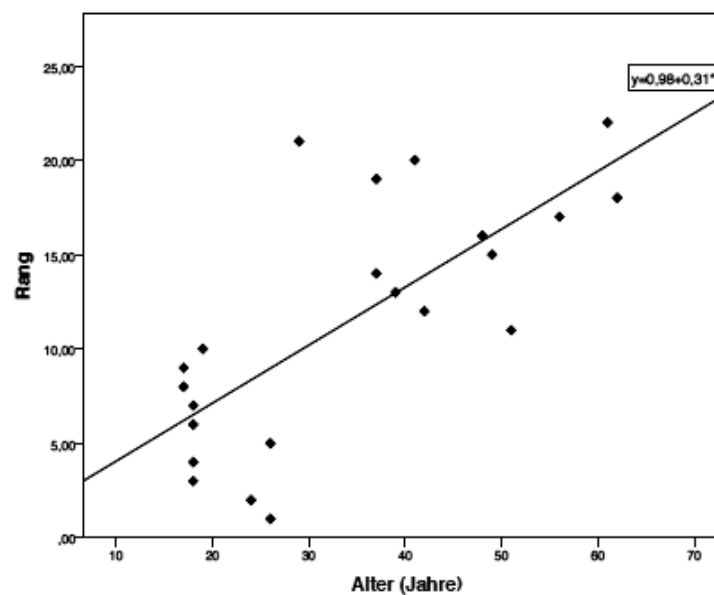


Abbildung 20.1.1: Zusammenhang zwischen dem Alter und der Position im Expertenranking (Rang).

20.1.2 Nebenuntersuchung

Auch innerhalb der Stichprobe der Nebenuntersuchung konnte eine hoch signifikante starke positive Korrelation zwischen dem Alter und der Position im Expertenranking festgestellt werden ($r = 0,710$, $p = 0,002$).

20.2 Alter und körperliche Leistungsfähigkeit

20.2.1 Hauptuntersuchung

Es konnte ein statistisch höchst signifikanter starker linearer Zusammenhang zwischen dem Alter und der relativen maximalen Sauerstoffaufnahme der Probanden festgestellt werden ($F(1;19) = 42,479$, $p = 0,000$, $R^2 = 0,675$). Abbildung 20.2.1 visualisiert den linearen Zusammenhang zwischen dem Alter und der relativen maximalen Sauerstoffaufnahme im Laufbandstufentest.

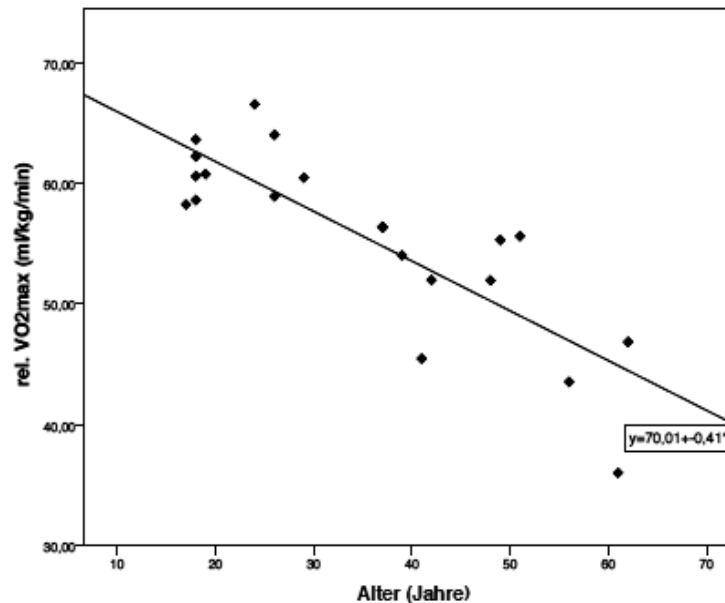


Abbildung 20.2.1: Zusammenhang zwischen dem Alter und der testspezifischen relativen maximalen Sauerstoffaufnahme der Probanden.

Auch für die Sauerstoffaufnahme an der anaeroben Schwelle zeigte sich ein statistisch höchst signifikanter linearer Zusammenhang mit dem Alter ($F(1;20) = 26,867$, $p = 0,000$, $\beta = -0,757$, $\beta = -0,832$, $R^2 = 0,552$, $y = -0,389x + 59,644$).

20.2.2 Nebenuntersuchung

Für die Ergebnisse der sportmotorischen Tests konnte ein höchst signifikanter linearer Zusammenhang zwischen dem Alter der Probanden und ihrer Zeit im Sprinttest festgestellt werden ($F(1;19) = 31,37$, $\beta = 0,789$, $p = 0,000$, $R^2 = 0,623$). Abbildung 20.2.2 veranschaulicht den linearen Zusammenhang zwischen dem Alter und der 30 m-Sprintzeit.

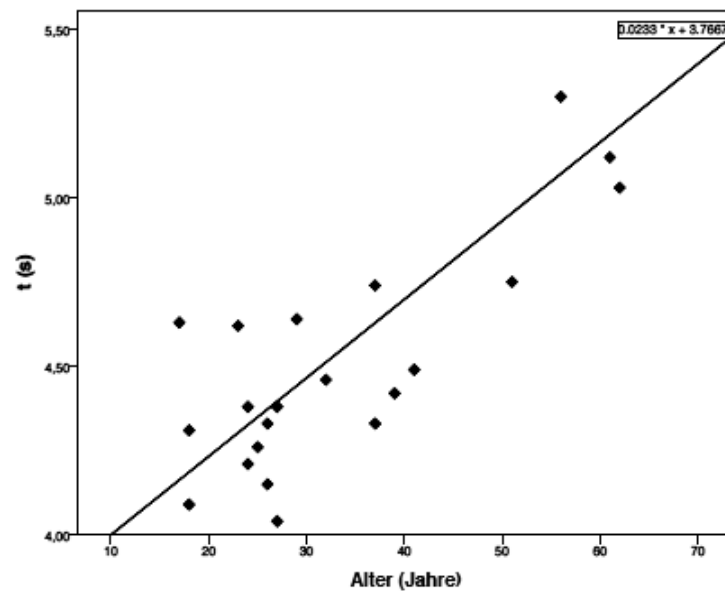


Abbildung 20.2.2: Zusammenhang zwischen dem Alter und der 30 m-Sprintzeit.

Für die Leistung im Einbeinstand und insbesondere im EBSII konnte ein statistisch hoch signifikanter linearer Zusammenhang mit dem Alter der Probanden nachgewiesen werden ($F(1;18) = 14,667$, $\beta = -0,681$, $p = 0,000$, $R^2 = 0,463$). Abbildung 20.2.3 verdeutlicht die Abhängigkeit der erreichten Zeit im EBSII vom Alter der Probanden.

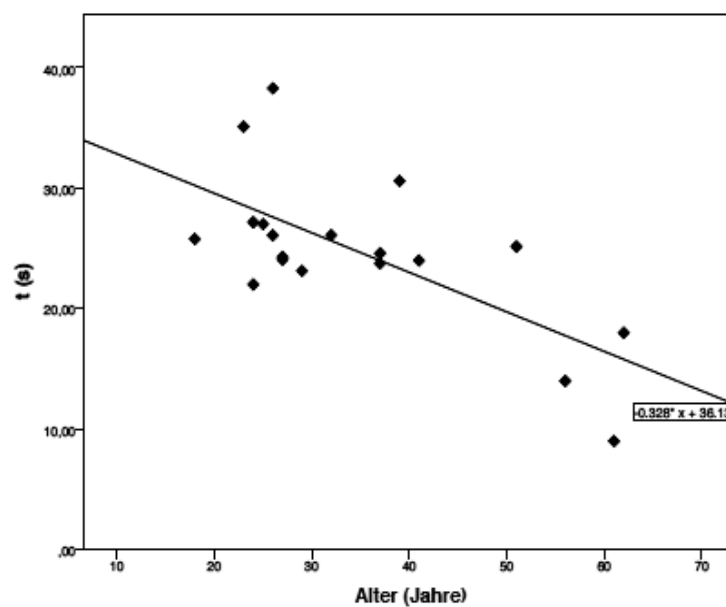


Abbildung 20.2.3: Zusammenhang zwischen dem Alter und der erreichten Zeit im EBSII.

Teil IV

Diskussion

21 Methodenkritik

21.1 Stichprobe

Bedingt durch die Kriterien der Probandenauswahl (s. Kapitel 8) ergab sich eine Einschränkung auf männliche Probanden mittleren bis sehr hohen Spielniveaus. Im Kontext einer externen Validierung der Ergebnisse sowie der weiteren Ausdifferenzierung des Anforderungsprofils Squash scheinen weitere Längs- und Querschnittanalysen auch unter Berücksichtigung des Damensquashs erforderlich zu sein. Obwohl die Probandengruppe Squash national ausschließlich aus Spielern der deutschen Nationalmannschaft bestand, ist eine Aussage über Squash auf internationalem Spielniveau auf Grund der geringen Anzahl international agierender Spieler nur stark eingeschränkt möglich.

Da es daneben keine Einschränkungen bei der Probandenauswahl bzgl. des maximalen Alters gab, ist die Altersspanne innerhalb der untersuchten Stichprobe sehr groß. Hier zeigen die Ergebnisse, dass das Alter eine trennende Größe zwischen den beiden untersuchten Spielniveaus darstellt. Dies führt dazu, dass eine eindeutige Deklaration gefundener systematischer Effekte bei Vergleich der beiden Spielniveaus als spielniveauinduziert oder altersbedingt nicht eindeutig möglich erscheint. Dieser Aspekt wurde jedoch im Verlauf der Diskussion unter Berücksichtigung potentieller Kausalzusammenhänge von Alter, Spielstärke und körperlicher Leistungsfähigkeit genauer betrachtet. Mit Blick auf die bisherige Datenlage können die beiden Subgruppen aus anthropometrischer Perspektive jedoch als für das entsprechende Spielniveau repräsentativ eingestuft werden.

Der Stichprobenumfang ist mit 22 bzw. 21 Probanden relativ klein. Dies stellt insbesondere bei Subgruppenanalysen eine wesentliche Limitation der Studie dar. So weisen die Prüfwerte der statistischen Poweranalyse bei nichtsignifikanten starken Unterschieden zwischen zwei Stichproben auf einen potentiell zu geringen Stichprobenumfang für eine klare, systematische Trennung der Spielniveaus vor allem hinsichtlich der Parameter der zeitlichen Belastungsstruktur hin. Dieser Eindruck wird durch hohe Korrelationen von Spielstärke und zuvor als nicht trennend deklarerter zeitlicher Belastungsgrößen gestärkt. Um einen auf Basis der Ergebnisse dieser Arbeit zu erwartenden starken Effekt ($d > 0,5$) mit einer Wahrscheinlichkeit von 80 % nachweisen zu können, wäre laut statistischer Poweranalyse ein Stichprobenumfang von insgesamt 102 Probanden erforderlich.

21.2 Videoanalyse

Beim Aufbau der Videostation wurde darauf geachtet, dass durch die gewählte Position im Bild der Videokamera das gesamte Spielgeschehen erfasst wurde. Die Qualität der Videoaufnahmen erwies sich in allen Fällen als ausreichend gut, um alle ausgewählten Beobachtungsaspekte in annähernd allen Spielsituationen eindeutig zu erfassen. Jedoch waren durch die Position der Kamera außerhalb des Courts die Analysemöglichkeiten limitiert. Eine zusätzliche Aufnahme des Spielgeschehens von der Courtdecke hätte eine Auswertung der Bewegungsgeschwindigkeit, der zurückgelegten Distanz sowie eine dreidimensionale Bewegungsanalyse ermöglicht. Dies konnte jedoch am Untersuchungsort auf Grund der Courtbauweise nicht realisiert werden. Da darüber hinaus die Daten der Schrittzähler nicht plausibel waren und GPS-Sender aus technischen Gründen nicht eingesetzt werden konnten, konnte lediglich auf Basis der Aktionsrate der unteren Extremitäten hypothetisch auf die Bewegungsgeschwindigkeit und die zurückgelegte Distanz rückgeschlossen werden. Auch muss hinsichtlich der innerhalb der Videoanalyse erfassten Daten konstatiert werden, dass trotz des Versuchs der Gewährleistung einer möglichst hohen Datenqualität die Analyse nicht automatisiert per Computer erfolgte, so dass ein gewisses Maß an Subjektivität in den Ergebnissen nicht zu vermeiden war, deren Größenordnung jedoch statistisch überprüft wurde.

21.3 On-Court-Spiroergometrie

Zur Gewährleistung einer möglichst hohen Vergleichbarkeit wurden alle On-Court-Spiroergometrien auf demselben Court nach identischer Courtvorbereitung durchgeführt. Das Tragen der portablen Spiroergometriegeräte im Spiel kann prinzipiell als relativ problemlos bewertet werden. So meldeten die Spieler nach Ende der Spiele zurück, dass sie nach einer kurzen Gewöhnungsphase zu Beginn des Einspielens keine gravierenden Einschränkungen hinsichtlich Sichtfeld und Bewegungsfreiheit empfunden haben und bewerten auch den Tragekomfort als gut. Cureton et al. (1978) konnten diesbezüglich zeigen, dass ein Zusatzgewicht von $\leq 10\%$ keine Beeinträchtigung der Bewegungsökonomie bedingt, so dass insgesamt davon ausgegangen werden kann, dass die Spieler durch das Tragen eines portablen Spiroergometrie-gerätes im Spiel nicht wesentlich in ihrer Spielfähigkeit beeinträchtigt wurden.

Dennoch zeigte sich im Verlauf der On-Court-Spiroergometrie, dass portable Spiroergometer für die gleichzeitige Atemgasmessung zweier auf einem $\sim 60\text{ m}^2$ großen Spielfeld unter Wettkampfbedingungen agierenden Spieler nicht ausgelegt sind. So ergaben sich insgesamt 20 Situationen in den Spielen, in denen sich primär durch Gegnerkontakt die Turbine von der Gesichtsmaske löste. Dies entsprach 0,9 Maskenabgängen pro Satz Squash national und 0,1 Maskenabgängen pro Satz Squash

regional. Auch wenn die Störungen innerhalb der Datenmessung aus allen Datenblättern entfernt und anschließend die Konsistenz der Daten überprüft wurde (s. Kapitel 21.7), hat dies auf Grund der möglichen Entfernung von sowohl zeitlichen als auch physiologischen Belastungsspitzen in den durchschnittlich 18,24 s langen entfernten Ballwechseln sowie einem nicht kontrollierbaren Erholungseffekt in den sich durch den Maskenabgang ergebenden durchschnittlich 39,45 s langen Spielunterbrechungen eine potentielle Verzerrung von Belastung, Beanspruchung und Energiebereitstellung zur Folge, deren Effekt nicht eindeutig abschätzbar ist. Insgesamt kann aus den Maskenabgängen eine durchschnittliche Spielzeitverkürzung von ~ 27 s pro Satz und somit unter Veranschlagung der durchschnittlichen metabolischen Leistung eine geschätzte nicht erfasste Energiemenge von $\sim 400 \text{ J kg}^{-1}$ berechnet werden. Da sich jedoch 90 % der Maskenabgänge in Spielen der Probandengruppe Squash national ereigneten, sind die Daten Squash national von dieser Verzerrung besonders betroffen. Bei Veranschlagung der ermittelten durchschnittlichen Dauer der entfernten Spielzeit kann hier eine durchschnittliche Spielzeitreduktion durch außerordentliche Störungen von ~ 52 s pro Satz und folglich eine nicht erfasste Energiemenge von annähernd 800 J kg^{-1} approximiert werden. Es kann vermutet werden, dass aus den außerordentlichen Spielunterbrechungen auf Grund überproportional langer Erholungsphasen eine Reduktion der mittleren Beanspruchung resultiert, was eine mögliche Erklärung für die leicht geringere physische Ausbelastung der Probanden Squash national darstellen könnte. Diese Limitation hätte vermutlich durch Einschränkung der spiroergometrischen Untersuchung auf jeweils nur einen Spieler einer Begegnung vermieden werden können.

Da es sich darüber hinaus bei den Spielen innerhalb der On-Court-Spiroergometrie nicht um offizielle Wettkämpfe, sondern lediglich um Wettkampfsimulationen handelte, können mögliche Effekte einer vergleichsweise geringen Motivation der Spieler auf die Belastung und Beanspruchung im Spiel nicht ausgeschlossen werden. Spiroergometrische Untersuchungen in offiziellen Squashspielen scheinen jedoch derzeit aus technischen Gründen noch nicht möglich.

21.4 Berechnung der anteiligen Energiebereitstellung

Da eine valide Messung der Ruhewerte im Stehen vor Spielbeginn nicht sinnvoll erschien, wurde die Sauerstoffaufnahme zur Berechnung des Grundumsatzes wie beschrieben in Anlehnung an Beneke et al. (2004) als Äquivalent für die Ruhesauerstoffaufnahme im Stehen bei Männern mit $4,5 \text{ l kg}^{-1} \text{ min}^{-1}$ geschätzt. Obwohl sich die Approximation des Grundumsatzes per festgelegter Faktoren in der Praxis der Erstellung energetischer Profile im Sport etabliert hat (u. a. Beneke et al., 2004; Bussweiler, 2014; Davis et al., 2014; Latzl, 2017), existieren unterschiedliche Vorschläge

zur Schätzung der Sauerstoffaufnahme in Ruhe einem Grundumsatz von in etwa 1 bis $1,6 \text{ kcal h}^{-1} \text{ kg}^{-1}$ entsprechend (Biesalski & Grimm, 2011; Ciba & Geigy, 1985). Die Berechnungsmethode der Sauerstoffaufnahme in Ruhe hat bei der Berechnung des Energiebedarfs und der anteiligen Energiebereitstellung jedoch nur Einfluss auf die aerob bereitgestellte Energiemenge (s. Kapitel 11.4). Bei Veranschlagung eines per obiger Werte bestimmten rechnerischen Minimums und Maximums für den Grundumsatz ergibt sich im konservativen Berechnungsmodell eine maximale Veränderung der aeroben Energiemenge um $< 2 \%$ und des aeroben Energieanteils um weniger als $0,02 \%$. Der Einfluss der Wahl des Äquivalentes zur Schätzung der Ruhesauerstoffaufnahme auf das energetische Profil kann folglich als gering bewertet werden.

Wie in Kapitel 11.4 dargestellt basiert die Bestimmung der im Spiel anaerob alaktazid bereitgestellten Energiemenge auf der der schnellen Komponenten der EPOC der einzelnen Sätze zuzuordnenden Sauerstoffmenge. Heck & Schulz (2002) weisen im Kontext der Quantifizierung des anaerob alaktaziden Energieanteils darauf hin, dass einerseits eine exakte Trennung der schnellen und langsamen Komponente der EPOC kaum möglich ist und andererseits die der überschüssigen Nachatmung zuzuordnende Sauerstoffmenge häufig das theoretische Maximum der anaeroben Kapazität übersteigt. Als mögliche Ursache wird genannt, dass bis zu 500 ml der Sauerstoffaufnahme in der schnellen Komponente der Nachatmung zur Reoxygenierung von Myoglobin und Hämoglobin benötigt wird (Davis et al., 2014). Dies kann prinzipiell eine Überbewertung der anaerob alaktazid bereitgestellten Energiemenge von bis zu 10 kJ bedingen, was im konservativen Modell einer Überbewertung der Beteiligung des anaerob alaktaziden Energiestoffwechsels an der Energiebereitstellung um bis zu 2 % entsprechen würde.

Als problematisch kann darüber hinaus respektiv bewertet werden, dass die Berechnung des Anteils des anaerob alaktaziden Energiestoffwechsels an der Energiebereitstellung des ersten und zweiten Satzes auf Grund der Regularien, Testmodalitäten sowie der Berechnungsmethodik von der Dauer der Satzpause bzw. von der Dauer der Sitzphase innerhalb der Satzpause abhängig war. Eine Analyse der Dauer der Sitzphasen zeigte, dass die Probanden Squash national hoch signifikant kürzer saßen als die Probanden Squash regional, woraus physiologisch eine längere Regenerationszeit für die anaerob alaktazide Komponente resultiert. Folglich scheint der in Relation leicht höhere Anteil des anaerob alaktaziden Stoffwechsels an der Energiebereitstellung Squash regional primär Konsequenz der unterschiedlich langen Dauer der Sitzphasen zu sein. Diese Abhängigkeit ließe sich zum einen durch ein strikt genormtes Pausenverhalten vermeiden, wodurch jedoch die Realitätsnähe der Wettkampfsimulation reduziert würde. Zum anderen könnte unabhängig vom

Pausenverhalten der einzelnen Spieler die innerhalb der Pausen der Resynthese von Kreatinphosphat zuzuordnende Sauerstoffaufnahme als der Dauer der Pausen zwischen den Sätzen entsprechende Fraktion der schnellen Komponente der EPOC in der Nachbelastung berechnet werden. Dies würde jedoch einerseits ebenfalls die Realitätsnähe des Modells reduzieren und andererseits auf Grund der nicht berücksichtigten Aktivitäten in den Satzpausen die Gefahr einer Überbewertung des anaerob alaktaziden Energieanteils bergen. Alternativ könnte zur Erhöhung der Vergleichbarkeit der Ergebnisse der einzelnen Probanden die Nachatmung innerhalb der Satzpausen bei der Berechnung des anaerob alaktaziden Energieanteils nicht berücksichtigt werden. Dies hätte jedoch eine deutliche Reduktion des Beitrages des anaerob alaktaziden Stoffwechsels auf einen Anteil von lediglich 3 % Squash national und 3,5 % Squash regional zur Folge.

Einen weiteren Einfluss auf die Berechnung der anteiligen Energiebereitstellung hat die Wahl des Sauerstoff-Laktat-Äquivalentes, für welches nach di Prampero (1981) in Abhängigkeit des Laktat-Verteilungsraumes Werte zwischen 2,7 und 3,3 ml $\text{O}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ pro mmol l}^{-1}$ Blutlaktat veranschlagt werden können. Bei Berechnung der pro Satz durchschnittlich anaerob laktazid bereitgestellten Energiemenge unter Verwendung der jeweiligen Extrema für das Sauerstoff-Laktat-Äquivalent ergibt sich im konservativen Modell eine absolute Abweichung von $\sim 10 \%$. In Relation zur insgesamt bereitgestellten Energiemenge verändert sich jedoch die Beteiligung des anaerob laktaziden Energiestoffwechsels um weniger als 0,2 %.

Trotz der Tatsache, dass di Prampero & Ferrauti (1999) die prinzipielle Korrektheit des mathematischen Modells zur Berechnung der anteiligen Energiebereitstellung bei körperlicher Belastung verdeutlicht haben, zeigt das konservative Modell unabhängig von den dargestellten Berechnungsproblemen auch Schwächen hinsichtlich der Erfassung der tatsächlich ablaufenden Energiestoffwechselprozesse bei intermittierender Belastung. So wird beispielsweise die in den Pausen zwischen den Ballwechseln zur PCr-Resynthese nachgeatmete Sauerstoffmenge in dem Modell nicht erfasst. Ebenso wird bei der Berechnung des Δ_{BLC} die Laktatelimination in der Pause zwischen den Ballwechseln nicht berücksichtigt. Dies birgt die Gefahr einer generellen Unterbewertung der Beteiligung anaerober Stoffwechselprozesse an der Energiebereitstellung im Squash. Vor diesem Hintergrund scheint das erweiterte Modell die tatsächliche Energiebereitstellung im Squash realitätsnäher zu beschreiben. Jedoch muss darauf hingewiesen werden, dass auf Grund einer nicht möglichen Trennung der Sauerstoffkinetik im Messprotokoll der Sätze in Belastungs- und Erholungsphasen die Dynamik der schnellen Komponente der Nachatmung in den Pausen zwischen den Ballwechseln im erweiterten Modell aus der Dynamik der schnellen Komponente der Modellfunktionen der EPOC nach Spielende abgeleitet und dar-

über hinaus den Berechnungen eine durchschnittliche Belastung-Pause-Relation mit durchschnittlich langen Belastungs- und Erholungsphasen zu Grunde gelegt wurde. Diese Vereinfachung des realen Modells könnte ebenfalls eine Verzerrung der tatsächlichen Energiebereitstellung im Squash bedingen. Unter Berücksichtigung einer mit zunehmender Netto-Gesamtspielzeit steigenden Dominanz des aeroben Energiestoffwechsels bei Abnahme der anaerob alaktaziden Energiebereitstellung könnte dadurch primär eine Überbewertung des anaerob alaktaziden Energieanteils resultieren. Darüber hinaus muss darauf hingewiesen werden, dass die Berechnung der anteiligen Energiebereitstellung in Form einer Ganzkörperbilanz erfolgt ist. Die Erfassung der Energiebilanz einzelner Aktionen war auf Basis der erhobenen Daten nicht möglich. Somit ist nicht auszuschließen, dass durch das Nichterfassen potentiell temporär anaerob laktazider Energiebereitstellung einzelner Muskelgruppen mit anschließender intra- und interzellulärer Laktatutilisation als Substrat aerober Stoffwechselprozesse während körperlicher Belastung die Beteiligung des anaerob laktaziden Stoffwechsels an der Energiebereitstellung im Squash durch die Ergebnisse dieser Arbeit unterschätzt wird. Die Analyse der Energiebereitstellung einzelner squashtypischer Aktionen sowie einzelner nach Länge kategorisierter Ballwechsel (sehr kurz, kurz, mittel und lang) könnte diesbezüglich weiteren Aufschluss über die tatsächliche Beteiligung der einzelnen Energiestoffwechsel im Squash geben.

21.5 Laufbandspiroergometrie

Da es das Ziel der Leistungsdiagnostik war, die Leistung und physische Ausbelastung der Probanden an zuvor definierten Laktatschwellen zu bestimmen und trotzdem die maximale aerobe Leistungsfähigkeit gemessen an ihrer maximalen Sauerstoffaufnahme gut zu approximieren, wurde unter Berücksichtigung dessen, dass Squash eine laufintensive Sportart ist, eine Laufbandspiroergometrie mit stufenförmigem Belastungsprotokoll gewählt. Auf Grund einer der primären Vergleichsgruppen geschuldeten zu erwartenden sowohl alters- als auch spielniveaubedingten Heterogenität im Bezug auf die aerobe Leistungsfähigkeit der Probanden wurde nach einigen Vortests vor dem Hintergrund der Untersuchungsergebnisse von Franke et al. (2009) das Testprotokoll wie in Kapitel 11.1 dargestellt konzipiert, welches in vergleichbarer Form bereits im Squash und Badminton zur Bestimmung der aeroben Leistungsfähigkeit eingesetzt wurde (u. a. Bunc & Süss, 2004; Heller, 2010). Franke et al. (2009) empfehlen bei Sportlern auf Grund einer potentiell geringen Laufökonomie und möglichen Problemen beim Durchhalten von hohen Geschwindigkeiten geringe Laufgeschwindigkeiten und konnten zusätzlich zeigen, dass die besten Resultate im Bezug auf die maximale Sauerstoffaufnahme im Vergleich unterschiedlicher Stufenprotokolle auf dem Laufband bei einer fixen Steigung von 5 % erzielt werden. Durch die Wahl des in Kapitel 11.1 beschriebenen Stufenprotokolls

ergaben sich jedoch zwei wesentliche Probleme: Mit einer Stufenlänge von 3 min und einer durchschnittlichen Testdauer von > 34 min Squash national und > 25 min Squash regional überschreitet die Gesamtbelastungsdauer (> 27 bzw. > 20 min) die hinsichtlich einer verlässlichen Bestimmung der maximalen Sauerstoffaufnahme von Tschopp et al. (2001) empfohlene Idealbelastungsdauer von 8 – 12 min bei Weitem. Dennoch konnte bei sieben der insgesamt 22 Probanden am Ende des Tests ein Levelling Off der Sauerstoffaufnahme beobachtet werden, so dass eine Bestimmung der $\dot{V}O_{2\max}$ auch mit dem verwendeten Belastungsprotokoll prinzipiell möglich war. Daneben lag bei fünf Probanden die maximale Herzfrequenz unterhalb der zu erwartenden maximalen Herzfrequenz. Da auch die Ermittlung der maximalen Herzfrequenz eher kurzzeitige maximale Belastungen beispielsweise innerhalb eines Vita-max-Tests erfordert, erscheinen die Stufen sowie die durchschnittliche Belastungsdauer auch hinsichtlich einer validen Bestimmung der maximalen Herzfrequenz potentiell zu lang. Dies könnte insgesamt darauf hinweisen, dass die tatsächlichen Maximalwerte der Probanden nicht valide gemessen werden konnten und die gemessenen Maxima demzufolge nach Meyer et al. (1999) lediglich als testspezifische Maxima ($\dot{V}O_{2\text{peak}}$ bzw. HR_{peak}) verstanden werden müssen.

Das zweite sich aus dem Testdesign ergebende Problem bestand darin, dass bei vier Probanden Squash regional (Alter: $51,75 \pm 8,69$ Jahre, $v_{\max} = 2,83 \pm 0,45 \text{ m s}^{-1}$, Testende in Stufe 5, $13 \pm 2,25$) auf Grund hoher monotoner Anstiege der Blutlaktatkonzentration unmittelbar nach Testbeginn ($\Delta_{\text{BLC}} = 2,85 \pm 1,52 \text{ mmol l}^{-1}$ am Ende der ersten Stufe) keine sinnvolle Bestimmung der individuellen aeroben Schwelle über einen initialen Anstieg der Blutlaktatkonzentration von $> 0,3 \text{ mmol l}^{-1}$ im Vergleich zur Blutlaktatkonzentration in Ruhe möglich war. Aus diesem Grund wurde innerhalb der Ergebnisdarstellung lediglich die fixe 2 mmol l^{-1} -Schwelle nach Kindermann et al. (1979) alternativ als aerobe Schwelle betrachtet. Bei der Interpretation der Leistungsfähigkeit bzw. Beanspruchung an den Laktatschwellen sowie der Einstufung der Beanspruchung auf dem Court in Relation zu diesen Schwellenwerten muss somit berücksichtigt werden, dass hier fixe Blutlaktatkonzentrationen verwendet wurden und die Ergebnisse somit streng genommen keine validen Aussagen über die wahren Schwellenwerte der Probanden ermöglichen. Um diesen Aspekt zu unterstreichen, wurden die Schwellenwerte mit den Indizes BLC_2 und BLC_4 gekennzeichnet.

Es ist darüber hinaus bekannt, dass die Qualität der Messung der maximalen Sauerstoffaufnahme unter anderem von der Testform und den Testmodalitäten abhängt und obwohl sich die verschiedenen Spiroergometrieformen im Labor als gängige Methode zur Ermittlung der aeroben Leistungsfähigkeit sportartunabhängig etabliert haben, die $\dot{V}O_{2\max}$ von Sportlern in die Anforderungen der Sportart simulierenden sportartspezifischen Tests valider gemessen werden kann. Auch für die Sportart Squash wurden solche Feldtests entwickelt, die als valide und reliabel gelten (Girard

et al., 2005; Wilkinson et al., 2009). Girard et al. (2005) verglichen die Validität von Labor- und Feldtests zur Bestimmung der maximalen aeroben Leistungsfähigkeit im Squash. Sie konnten zeigen, dass die innerhalb eines speziell entwickelten squash-spezifischen Feldtest gemessene maximale Sauerstoffaufnahme die innerhalb einer Laufbandspiroergometrie (Start bei 10 km h^{-1} , Steigerung alle 2 min um 1 km h^{-1} , 0 % Steigung) ermittelte $\text{rel } \dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$ um mehr als 15 % überstieg. Obwohl die Modalitäten der von Girard et al. (2005) durchgeführten Laufbandspiroergometrie hinsichtlich der Bestimmung der maximalen Sauerstoffaufnahme nach den Empfehlungen von Franke et al. (2009) und Tschopp et al. (2001) als nicht optimal einzustufen sind, deutet dies darauf hin, dass die maximale Sauerstoffaufnahme von Squashspielern innerhalb einer Laufbandspiroergometrie nicht valide gemessen werden kann und diese somit bei Anwendung einer Laufbandspiroergometrie potentiell unterschätzt wird. Eine alternative Durchführung des in Girard et al. (2005) beschriebenen squash-spezifischen Stufentests erschien jedoch vor dem Hintergrund der angestrebten Laktatdiagnostik nicht sinnvoll.

21.6 Sportmotorische Testbatterie

Das Zusammenstellen der sportmotorischen Testbatterie erfolgte innerhalb der Planung der Gesamtstudie vor Durchführung der ersten Untersuchungen Ende 2013. Zu diesem Zeitpunkt lagen folglich noch keine Erkenntnisse zum Belastungs-, Beanspruchungsprofil und energetischen Profil aus den anderen Teiluntersuchungen sowie keine aktuellen Forschungsergebnisse zur Fitness im Herrensquash vor, so dass die Auswahl potentiell bedeutsamer motorischer Fähigkeiten und die Wahl zur Testung dieser geeigneter Methoden auf Expertenmeinungen, den Resultaten früherer Publikationen zu dem Thema und dem Konsens der sportwissenschaftlichen Forschung basierte und auf eine möglichst multidimensionale Erfassung der motorischen Fähigkeiten abzielte. Aus diesem Grund wurden bestimmte, unter Berücksichtigung der Ergebnisse dieser Arbeit respektiv als potentiell bedeutend einzustufende motorische Fähigkeiten nicht erfasst. So scheint beispielsweise eine gute unilaterale Reaktivkraft der unteren Extremitäten vor dem Hintergrund des identifizierten Zusammenhangs von Antritten und maximalen Ausfallschritten ebenfalls bedeutsam zu sein. Um die Bedeutung dieser Fähigkeiten eindeutig beurteilen und ebenfalls Normwerte für die Sportart Squash generieren zu können, sollte das Fähigkeitsniveau diesbezüglich in einer Folgeuntersuchung erhoben werden.

Bei Betrachtung aller im Squash vorkommenden Bewegungen erscheint das durch die Standard-Testbatterie abgebildete motorische Fähigkeitsprofil viel zu grob, um alle Profilvermerkmale valide abzubilden. So könnte beispielsweise die unilaterale Schnellkraft der oberen Extremitäten bei Rotationsdruckbewegungen hinsichtlich der Schlagkraft eine aussagekräftigere Größe als die bilaterale konzentrische Schnellkraft

darstellen. Auch scheint die Beweglichkeit anhand des Sit-and-Reach-Tests nicht ausreichend differenziert bewertbar. Hier scheint eine umfassende Beweglichkeitsanalyse beispielsweise in Form einer FMS-Diagnostik erforderlich zu sein, um die Beweglichkeit im Squash genauer beschreiben zu können. Ebenso lassen die Ergebnisse im Fallstabtest keine Aussage über die tatsächliche Reaktionsschnelligkeit im Spiel zu, in welchem neben einer möglichst schnellen Reizleitung auch die Auswahl einer möglichst adäquaten motorischen Antwort auf einen Reiz sowie die Inhibition von wesentlicher Bedeutung sein könnten.

Obwohl im Vorfeld der Untersuchungen der Antrittsschnelligkeit und Beschleunigungsfähigkeit eine größere Bedeutung als der Maximalgeschwindigkeit beigemessen wurde, konnten auf Grund technischer Probleme die exakten 5 und 10 m-Zwischenzeiten der meisten Probanden nicht bestimmt werden, weshalb auf eine Darstellung dieser Werte im Ergebnisteil verzichtet werden musste. Eine Beurteilung der Bedeutung einer möglichst hohen Antrittsschnelligkeit und Beschleunigungsfähigkeit konnte innerhalb dieser Arbeit somit nicht erfolgen. Darüber hinaus lagen für den EBSII, dem CDS und dem MS keine Normwerttabellen vor, so dass diesbezüglich keine Einordnung des Fähigkeitsniveaus in Relation zum Bevölkerungsquerschnitt vorgenommen werden konnte. Ebenfalls muss an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, dass die einzige Normwerttabelle zur Bewertung der Sprintleistung im 30 m-Sprinttest für die Altersklasse zwischen 17 und 19 Jahren ausgelegt ist und darüber hinaus keine Altersdifferenzierung vornimmt. Da Korhonen et al. (2003) eine Abnahme der Beschleunigung und Maximalgeschwindigkeit alle 10 Jahre ab dem 40 Lebensjahr von 5 – 6 % nachweisen konnten und auch innerhalb dieser Arbeit eine signifikante Abnahme der Maximalgeschwindigkeit mit zunehmendem Alter festgestellt werden konnte, scheint die Anwendung der Normwerttabelle nach Davis et al. (2000) zumindest die Leistung der älteren Spieler im Vergleich zur Bevölkerung nicht widerzuspiegeln. Ebenfalls muss an dieser Stelle die händische Messung der Laufzeit im Change-of-Direction-Speed-Test per Stoppuhr kritisch betrachtet werden. Obwohl eine exakte Abschätzung der sich im Vergleich zur elektronischen Zeitmessung ergebenden Abweichung nicht möglich erscheint, kann jedoch ein potentieller Fehler von $\geq 0,1$ s vermutet werden. Bei der Einordnung der Ergebnisse der Probanden im Vergleich zur englischen Elite konnte diese potentielle Fehlergröße vernachlässigt werden, da auch hier die Zeitmessung manuell per Stoppuhr erfolgte. Wilkinson et al. (2012) berichten diesbezüglich einen Standardfehler von 0,13 s. Insgesamt sollten die Ergebnisse der Testbatterie lediglich als Indikatoren für wichtige und weniger wichtige motorische Fähigkeiten und potentielle Fähigkeitsdefizite interpretiert werden. Für eine komplexe Leistungsdiagnostik im Squash sollten zukünftig jedoch Tests gewählt werden, die die identifizierten KPIs direkter oder sportartspezifischer abbilden.

Obwohl auf Grund einer auf den Ergebnissen der Vortests basierend erwarteten zu geringen Trennung zwischen den Spielniveaus im EBSI der EBSII als weiterer Gleichgewichtstest mit in die Testbatterie aufgenommen wurde, zeigte der EBSI wider erwartend ein diesbezüglich größeres Trennungspotential. Da jedoch alle Spieler Squash national 0 Fehler im EBSI machten, scheint auf nationalem Spielniveau eine Testung mit dem EBSII erforderlich zu sein, um das Niveau der Gleichgewichtsfähigkeit ausreichend differenziert bewerten sowie diesbezügliche Empfehlungen aussprechen zu können. Die Entscheidung zur Durchführung einer der beiden Gleichgewichtstests sollte folglich kontextabhängig erfolgen.

21.7 Datenqualität

Eine Stärke der durchgeführten Studie ist die Verwendung standardisierter und hinsichtlich ihrer Reliabilität und Validität geprüfter Mess- und Analyseinstrumente. Das Erreichen einer zufriedenstellenden Datenqualität wurde überprüft und statistisch abgesichert. Eine Überprüfung der Qualität der Ergebnisse der Videoanalyse ergab hinsichtlich der primären Belastungsparameter R, DR, RT, S bei Überprüfung der Intra-Re-Test-Reliabilität in allen Fällen ein Cornbachs α zwischen 0,996 und 1. Der Variabilitätskoeffizient war für alle Parameter ≤ 1 %.

Die größte Abweichung der Ergebnisse bei Messwiederholungen ergab sich bei der Messung der Standzeit auf dem T. Die Berechnung der Variabilitätskoeffizienten bzgl. der gemessenen Standzeit innerhalb der T-Zone ergab für die Messreihen einen VK von 4,10 % sowie einen VK von 2,77 %. Für die Anzahl der Standzeitpunkte ergab sich jeweils ein VK von 0,87 % bzw. 2,41 %. Somit wurde der von Wiemann (1998) für eine ausreichend gute Reliabilität innerhalb der Bewegungs- und Trainingslehre empfohlene Variabilitätskoeffizient von 5 % nicht überschritten. Zur Bestimmung der Intra-Re-Test-Reliabilität wurde auch hier Cronbachs α berechnet. Ein Cornbachs α von 0,682 für die erste Messreihe und ein Cornbachs α von 0,610 für die zweite Messreihe wurde für die Art der Datenerhebung als ausreichend gut bewertet. Insgesamt wurde das Belastungsprofil somit als reliabel eingestuft.

Um die Konsistenz der erhobenen Daten zur Belastung und Beanspruchung insbesondere nach Entfernen der Störungen zu überprüfen, wurde die innerhalb der Erstellung des Belastungsprofils bestimmte Satzdauer mit der innerhalb der Datenblätter der physiologischen Parameter bestimmten Beanspruchungsdauer verglichen. Insgesamt ergab sich hier eine mittlere Abweichung von ~ 1 s zu Gunsten der per Videoanalyse bestimmten Belastungsdauer. Dies könnte beispielsweise auf die Rundung der Dauer der einzelnen Phasen auf zwei Nachkommastellen oder eine verzögerte physiologische Reaktion auf den Belastungsbeginn zurückzuführen sein. Bei Annahme einer maximalen durchschnittlichen Sauerstoffaufnahme von

4,20 l min⁻¹ bzw. 58,13 ml kg⁻¹ min⁻¹ und eines maximalen kalorischen Äquivalents von 21,131 J ml⁻¹ ergibt sich auf diese Weise ein maximaler Fehler < 21 J kg⁻¹.

Um Aussagen über mögliche Effekte der Spielprogression treffen zu können, wurden alle Spiele wie beschrieben auf drei Sätze genormt. Um sicherzustellen, dass durch diese Normierung die Daten nicht signifikant verändert wurden, wurden für alle zusammengefassten Parameter (Belastung, Beanspruchung und Energiebereitstellung) *t*-Tests für unabhängige Stichproben durchgeführt. Alle Tests waren nicht signifikant.

Hinsichtlich der Güte der Anpassung der Modellfunktion ergab sich ein durchschnittliches Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,855$. Somit wurde die Anpassung für alle Modelle der EPOC als gut bewertet.

Mit Ausnahme eines Probanden waren das erste und zweite Validitätskriterium der Berechnungsmethodik in allen Fällen erfüllt. Für einen Probanden überstieg die berechnete zur PCr-Resynthese aufgenommene Sauerstoffmenge den im Vorfeld berechneten individuellen Normwert. Nach eingehender Einzelfallanalyse wurde jedoch auch dieses Modell als ausreichend valide eingestuft (s. Anhang B.1). In 11 Fällen konnte eine Verletzung des dritten Validitätskriteriums registriert werden. Aus diesem Grund wurde die erste Stufe der Modellerweiterung in der weiteren Berechnung nicht berücksichtigt. Insgesamt ergab sich hier eine Überschreitung von durchschnittlich 84,07 ml, was einer potentiellen Überbewertung der in den ersten beiden Sätzen insgesamt anaerob alaktaziden bereitgestellten Energiemenge um $\sim 22 \text{ J kg}^{-1}$ entspricht. Unter der Annahme einer Verletzung des dritten Validitätskriteriums auf Grund einer Überbewertung der Sauerstoffaufnahme der schnellen Komponente in den Sitzphasen ergibt sich dadurch jedoch auch im konservativen Berechnungsmodell eine potentielle Überschätzung der innerhalb der anaerob alaktazid bereitgestellten Energiemenge um < 1 %.

22 Diskussion der Ergebnisse

22.1 Anthropometrie Squash

Körpergröße und Gewicht bestätigen den aus der bisherigen Datenlage ableitbaren Eindruck, dass Squashspieler diesbezüglich annähernd der Bevölkerungsnorm entsprechen. Die durchschnittliche Körpergröße der Probanden ist mit ~ 183 cm im Vergleich zur Norm als normal bis leicht überdurchschnittlich zu bewerten (Robert-Koch-Institut, 2018). Gemessen an einem durchschnittlichen BMI von ~ 24 sind die Probanden nach WHO (2000) als normalgewichtig einzustufen. Eine im Kontext einer möglichst großen Reichweite potentiell hohe Bedeutung der Armspanne konnte nicht festgestellt werden. Die Relation von Armspanne und Körpergröße entsprach mit $\sim 1 : 1$ ebenfalls der Norm (Ape-Index).

Obwohl die Ergebnisse dieser Arbeit einen potentiell systematisch geringeren BMI auf nationalem Spielniveau suggerieren, scheint der gefundene Effekt durch den BMI der international agierenden Probanden (~ 24) sowie seine geringe inhaltliche Bedeutung relativiert. Die Ergebnisse vorheriger Studien weisen zusätzlich daraufhin, dass Squashspieler bei normalem BMI einen unterdurchschnittlichen Körperfettanteil $\leq 15\%$ aufweisen. In diesem Kontext wurde vermutet, dass Körperfett sich unökonomisch auf das Bewegen im Court sowie die Energiebereitstellung auswirken würde (Chin et al., 1995). Die Ergebnisse lassen vermuten, dass im Squash in Hinblick auf eine möglichst große Reichweite bei möglichst hoher Beweglichkeit und ausdauernder Bewegungsschnelligkeit eine normale bis leicht überdurchschnittliche Größe bei normalem Gewicht und geringem Körperfettanteil von Vorteil ist.

Obwohl die getesteten deutschen Spieler größer und schwerer sind als asiatische oder südeuropäische Squashspieler (Chin et al., 1995) scheinen die anthropometrischen Daten der Probanden in Übereinkunft zur bisherigen Datenlage den Eindruck eines prinzipiell eher endo-mesomorphen Körpertypen zu bestätigen (u. a. Alvero Cruz et al., 2009). Bei Betrachtung der gesamten Stichprobe ist das durchschnittliche Alter der Probanden mit ~ 34 Jahren allerdings deutlich höher als das Durchschnittsalter der Probanden innerhalb der meisten Vergleichsstudien. Diesbezüglich konnte jedoch ein signifikanter spielniveautrennender Effekt nachgewiesen werden. So waren die Probanden Squash national im Schnitt um ~ 20 Jahre jünger als die Probanden Squash regional. Der große Mittelwertunterschied und das deutlich höhere Durchschnittsalter Squash regional im Vergleich zu den Spielern Squash national kann sicherlich zum Teil dadurch erklärt werden, dass die körperliche Leistungsfähigkeit bei Männern ab einem Alter von 26 Jahren vermehrt abnimmt (Weineck, 2010). Dies zeigte sich in den Ergebnissen dieser Arbeit in Form eines negativer Zusammenhangs zwischen dem Alter der Probanden und der aeroben Leistungsfä-

higkeit, der Maximalgeschwindigkeit und der Koordinationsfähigkeit. Folglich kann unter der Prämisse einer hohen Bedeutsamkeit der körperlichen Leistungsfähigkeit für die individuelle Spielstärke davon ausgegangen werden, dass das Durchschnittsalter in höheren Spielklassen geringer ist als in niedrigeren. Diese Vermutung wird durch die nachgewiesene Abnahme der Spielstärke mit zunehmendem Alter gestützt. Jedoch lassen sich hier auch Ausnahmen beobachten. Die Ausreißer bezüglich des Alters lassen sich potentiell dadurch erklären, dass in komplexen Sportsportarten die Spielleistung multifaktoriell bedingt ist (s. Kapitel 3) und somit auch ältere Spieler mit vergleichsweise schlechter physiologischer Leistungsfähigkeit beispielsweise auf Grund einer herausragend Technik und/oder ihrer Spielerfahrung insbesondere auf niedrigem Spielniveau mit jüngeren, physisch stärkeren, aber technisch und/oder taktisch weniger gut ausgebildeten Spielern konkurrieren können. Diese Vermutung scheint dadurch gestärkt, dass auf Basis der Ergebnisse dieser Arbeit nicht ausgeschlossen werden kann, dass auf regionalem Spielniveau die Spielerfahrung einen größeren Einfluss auf den Ausgang einer Partie als die Physis der Spieler hat. Unabhängig davon scheint bei Einschränkung des Probandenpools auf die Probandengruppe Squash national mit einem Durchschnittsalter von ~ 25 Jahren eine unmittelbare Vergleichbarkeit mit den meisten Publikationen zu Squash auf nationalem oder internationalem Spielniveau und insbesondere mit der Studie von Girard et al. (2007) gegeben.

Das Trainingspensum im Squash ist spielniveautrennend und auf nationalem Spielniveau bis zu mehr als doppelt so hoch wie auf regionalem Spielniveau. Es konnte eine systematische Zunahme der aeroben Leistungsfähigkeit mit steigendem Trainingspensum nachgewiesen werden, so dass bei zusätzlicher Berücksichtigung der nachgewiesenen negativen Korrelation von Trainingspensum und Spielstärke dieses einen entscheidenden Einfluss auf die Spielstärke zu haben scheint. Zur Partizipation in der nationalen Spitze scheint ein Trainingspensum von durchschnittlich mind. $\sim 12,5$ h pro Woche erforderlich, wobei mind. 40 % squashspezifisch zur Steigerung der sportartspezifischen körperlichen Leistungsfähigkeit trainiert werden sollte. Eine Auswertung des Trainingspensums der untersuchten Spieler Squash national zeigte einen durchschnittlichen Trainingsumfang im Bereich des Leistungssports aber unterhalb des Hochleistungssports, so dass diesbezüglich ein Rückstand der Nationalspieler im Vergleich mit Hochleistungssportlern anderer Sportarten vermutet werden kann. Die separate Analyse der international agierenden Spieler deutet diesbezüglich darauf hin, dass zum Spielen auf internationalem Spielniveau ein Trainingspensum von mehr als 24 h pro Woche notwendig ist. Dabei ist insbesondere eine Zunahme des ergänzenden Fitnesstrainings auf über 50 % zu beobachten.

22.2 Belastung im Squash

22.2.1 Zeitliche Belastungsstruktur

Das erhobene zeitliche Belastungsprofil spiegelt auf den ersten Blick nicht die aktuelle Datenlage zur zeitlichen Belastungsstruktur von Squash auf internationalem Spielniveau wider. So lag die Dauer der Ballwechsel 10 %, die Satzdauer 25 % und die Schlagfrequenz innerhalb der aktiven Spielzeit annähernd 10 % unterhalb der von Murray et al. (2014; 2016a) für Squash auf internationalem Spielniveau berichteten Werte. Allerdings erscheint ein Vergleich der erhobenen Daten mit denen für Squash auf internationalem Niveau auf Grund der Tatsache, dass zum Testzeitpunkt innerhalb der Hauptuntersuchungsstichprobe lediglich ein Spieler auf internationalem Niveau, alle anderen Spieler auf nationalem oder regionalem Niveau agierten, nicht aussagekräftig, um die Validität der Untersuchung bewerten zu können. Bei separater Betrachtung der zeitlichen Belastung der Spiele Squash national scheint eine unmittelbare Vergleichbarkeit mit der von Murray et al. (2016a) für Begegnungen von Spielern jenseits der Top 40 der Welt gegeben. Da darüber hinaus auch innerhalb dieser Arbeit eine Zunahme von Belastungsdauer, -umfang und Schlagfrequenz mit steigender Spielstärke nachgewiesen werden konnte, wird die innerhalb dieser Arbeit erhobene temporale Belastungsstruktur als valide eingestuft. Auf dieser Einstufung basierend wird auch der bei Murray et al. (2016a) berichtete Trend kürzer werdender Ballwechsel und Spiele bei steigender Schlagfrequenz durch die Ergebnisse dieser Arbeit bestätigt.

Ein Vergleich der erhobenen temporalen Belastungsstruktur mit der von Girard et al. (2007) zeigt jedoch auch bei separater Betrachtung der Spiele Squash national eine um ~ 17 % geringere durchschnittliche Ballwechseldauer, eine um ~ 13 % geringere effektive Spielzeit, eine um ~ 42 % geringere Belastung-Pause-Relation bei ca. 20 % kürzerer Satzdauer. Die innerhalb der Studie von Girard et al. (2007) veröffentlichten Daten zu Belastungsdauer und -dichte übersteigen folglich die innerhalb dieser Studie festgestellten Durchschnittswerte bei Weitem. Betrachtet man jedoch die Entwicklung der temporalen Belastungsstruktur von Einführung des aktuellen Zählsystems bis heute, so ist hier eine deutliche Abnahme der durchschnittlichen Dauer der Ballwechsel sowie der effektiven Spielzeit zu beobachten, so dass die Daten dieser Arbeit im Vergleich zu denen von Girard et al. (2007) die aktuelle temporale Belastungsstruktur im Squash besser widerzuspiegeln scheinen. Insgesamt bestätigen die Ergebnisse dieser Arbeit zur temporalen Belastungsstruktur den intermittierenden Charakter der Sportart mit einer Belastung-Pause-Relation von $\sim 1 : 1$.

Während die Dauer der Pausen zwischen zwei Ballwechseln sowie die Dauer der Pausen zwischen zwei Sätzen annähernd konstant ist, kann die Dauer der Ballwechsel, die Dauer der Sätze sowie die Dauer eines Spiels beispielsweise in Abhängigkeit

der Paarung sowie der Motivation der Spieler extrem variieren. Innerhalb dieser Studie konnten Ballwechsel von weniger als 2 s bis zu mehr als 75 s, Sätze über 4 min bis mehr als 10 min und Spiele¹ über 17 min bis 32 min beobachtet werden. Dabei waren die Ballwechsel bereits nach weniger als 2 s beendet, wenn der Aufschlagende direkt einen Punkt oder einen Fehler machte oder der Aufschlagreturn zum Punktgewinn oder Fehler führte. Lange Ballwechsel konnten vor allem dann beobachtet werden, wenn die Spieler gegenseitig auf einen Fehler des Gegners lauerten. Im Gegensatz zu den Ergebnissen von Girard et al. (2007), Vučkovič et al. (2010) und Murray et al. (2016a), jedoch in Übereinkunft mit denen von Montpetit et al. (1990) konnte eine Dominanz der Dauer der Ballwechsel zwischen 3 und 12 s festgestellt werden, die insgesamt mehr als 50 % aller Ballwechsel ausmachten. Die Ursache diesbezüglich scheint nicht eindeutig zu klären zu sein. So ist nicht klar, ob es sich hierbei um einen generellen Entwicklungstrend oder ein zufälliges Phänomen handelt, oder aber diese überproportionale Häufung in irgendeiner Form durch die Untersuchungsmethodik wie beispielsweise durch das Tragen der portablen Atemgasmessgeräte begründet war.

Vor dem beschriebenen Hintergrund scheint es nicht verwunderlich, dass ein Vergleich der Häufigkeitsverteilung sehr kurzer, kurzer, mittlerer und langer Ballwechsel innerhalb dieser Arbeit mit den Ergebnissen von Vučkovič et al. (2010) ~ 3 % mehr sehr kurze, ~ 6 % mehr kurze, ~ 1 % mehr mittlere und ~ 7 % weniger lange Ballwechsel als bei den Team Weltmeisterschaften 2003 zeigt, was zum Teil als Folge des heterogenen Spielniveaus zu interpretieren ist. So konnte eine deutliche Zunahme des Anteils längerer Ballwechsel mit steigender Spielstärke nachgewiesen werden. Die Tendenz einer mit steigender Spielstärke höheren Anzahl längerer Ballwechsel wird auch durch die Ergebnisse von Murray et al. (2016a) bestätigt. Dennoch wurden auch in den Spielen Squash national im Vergleich zu den Teamweltmeisterschaften 2003 ~ 2 % weniger sehr kurze, ~ 5 % mehr kurze, identisch viele mittlere und ~ 5 % weniger lange Ballwechsel gespielt. Vor dem beschriebenen Hintergrund veränderter Regularien könnten diese Unterschiede auch als ein Hinweis auf eine im Vorfeld vermutete regeländerungsinduzierte taktische Veränderung hin zu einem offensiveren Spiel mit mehr attackierenden Aktionen und in Folge dessen kürzeren Ballwechseln interpretiert werden.

Obwohl hinsichtlich der temporalen Belastungsstruktur zum Teil deutliche Unterschiede zwischen den Spielniveaus festgestellt werden konnte, kann Hypothese H 1.1 auf Grund fehlender statistischer Signifikanz nicht eindeutig bestätigt werden. Um eine Spielniveautrennung hinsichtlich der zeitlichen Belastungsstruktur bei einem erwartenden Effekt mindestens mittlerer Stärke mit einer Wahrscheinlichkeit von

¹Daten beziehen sich auf die auf drei Sätze genormten Spiele.

80 % zu identifizieren, wäre eine erneute Analyse von je 51 Spielen Squash national und Squash regional notwendig. Dennoch zeigte sich in Übereinkunft zu früheren Forschungsergebnissen, dass die Belastungsdauer (Dauer der Ballwechsel) und der Belastungsumfang (Gesamtspielzeit) mit steigender Spielstärke auch aktuell systematisch zunehmen, woraus bei relativ konstanter Dauer der Pausen zwischen den Ballwechseln auch eine Zunahme der Belastung-Pause-Relation und somit auch insgesamt eine Erhöhung der effektiven Spielzeit mit steigender Spielstärke resultieren. Vor dem Hintergrund der Erläuterungen in Kapitel 3 kann vermutet werden, dass die Zunahme der Belastungsnormativa Dauer, Dichte und Umfang gemeinsame Folge mit steigender Spielstärke zunehmender technischer und taktischer Fertigkeiten bei zunehmender körperlicher Leistungsfähigkeit ist. Eine Verbesserung der technischen Fertigkeiten mit steigendem Spielniveau wurde von Vučković et al. (2009) berichtet. Hughes & Robertson (1998) weisen auf bessere taktische Fertigkeiten auf höherem Spielniveau hin. Eine mit der Spielstärke zunehmende körperliche Leistungsfähigkeit konnte innerhalb dieser Arbeit nachgewiesen werden (s. Kapitel 22.6).

Allerdings erscheint die Mittelwertdifferenz hinsichtlich der durchschnittlichen Dauer der Ballwechsel und der Gesamtspielzeit Squash national und Squash regional im Vergleich zu früheren Untersuchungen deutlich reduziert. Im Gegensatz zu den Ergebnissen früherer Untersuchungen konnte darüber hinaus wie im Vorfeld auf der Prämisse eines zunehmend offensiveren Spiels vermutet eine systematische Zunahme der Schlagfrequenz mit steigender Spielstärke festgestellt werden, welche sich bezogen auf die Gesamtspielzeit sogar spielniveautrennend zeigte. Basierend auf diesen Ergebnissen kann vermutet werden, dass eine mit steigendem Spielniveau zweifelsohne zu erwartende und durch die Ergebnisse dieser Arbeit bestätigte Zunahme der physiologischen Anforderungen im Sinne einer höheren zu erbringenden metabolischen Leistung im Spiel (s. Kapitel 22.4) aktuell im Gegensatz zu früher durch eine an dieser Stelle zunächst gemessen an der Schlagfrequenz zunehmende Aktionsrate und ein daraus resultierendes potentiell höheres Spieltempo bei geringerer durchschnittlicher Erholungszeit begründet sein könnte. Auch dies verstärkt den Eindruck eines auf hohem Spielniveau tatsächlich immer offensiver werdenden Spiels.

22.2.2 Aktivitätsprofil

Wie bereits in Kapitel 21.2 dargestellt konnten hinsichtlich der Laufaktivitäten keine Daten zur zurückgelegten Distanz und Bewegungsgeschwindigkeit erhoben werden, so dass eine exakte Auswertung des Lauf tempos und somit eine diesbezügliche Klärung der aktuellen Datenlage nicht eindeutig möglich war. Dennoch erscheint eine grobe Abschätzung dieser Parameter auf Grundlage früherer Ergebnisse möglich. Basierend auf den Daten von Vučković et al. (2010) werden in sehr kurzen Ballwechseln

durchschnittlich 3,40 m, in kurzen Ballwechseln durchschnittlich 11,16 m, in mittleren Ballwechseln durchschnittlich 26,58 m und in langen Ballwechseln durchschnittlich 60,25 m zurückgelegt. Bei durchschnittlich 19 Ballwechseln pro Satz entspricht dies bei Berücksichtigung der Häufigkeitsverteilung der Dauer der Ballwechsel einer durchschnittlichen Gesamtstrecke innerhalb der aktiven Spielzeit pro Satz von schätzungsweise 355 m. Dieser hypothetische Wert liegt unterhalb der von Murray et al. (2016a) beschriebenen durchschnittlichen Strecke von 496,3 m, entspricht jedoch unter Berücksichtigung der aktiven Spielzeit mit $1,55 \text{ m s}^{-1}$ einer um mehr als 10 % höheren durchschnittlichen Geschwindigkeit und deutet damit eine potentielle Zunahme der durchschnittlichen Laufgeschwindigkeit an. Die Anzahl der innerhalb der aktiven Spielzeit eines Satzes insgesamt absolvierten Laufbewegungen unterschreitet mit durchschnittlich ~ 300 pro Satz sowohl absolut als auch bei Berücksichtigung der durchschnittlichen Satzdauer die von Eubank & Messenger (2000) veröffentlichten Werte. Jedoch erscheinen die Ergebnisse von Eubank & Messenger (2000) bei genauerer Betrachtung potentiell zu hoch. Bei Veranschlagung einer der Datengabe von 2003 entsprechenden durchschnittlichen Geschwindigkeit von $1,5 \text{ m s}^{-1}$ (Murray et al., 2016a) und unter Berücksichtigung der aus den Daten von Eubank & Messenger (2000) ableitbaren durchschnittlichen aktiven Spielzeit pro Spiel von ~ 24 min ergeben sich 2866 Schritte auf 2193,75 m, was einer durchschnittlichen Schrittlänge von 0,77 m und einer Aktionsrate von annähernd 120 apm entspricht. Vor dem Hintergrund einer beim Laufen zu erwartenden durchschnittlichen Schrittlänge von $> 1 \text{ m}$ (de Marées, 2003) erscheinen die innerhalb dieser Arbeit gemessene Anzahl und Rate an Laufaktionen zu der aus den erhobenen Daten abgeleiteten zurückgelegten Distanz konsistent und somit insgesamt plausibel.

Trotz fehlender systematischer Trennung zwischen den beiden Spielniveaus absolvierten die Spieler Squash national absolut und pro Minute der aktiven Spielzeit mehr Laufaktionen als die Spieler Squash regional. Bezogen auf die Gesamtspielzeit konnte diesbezüglich eine systematische Trennung festgestellt werden, was erneut den Effekt einer geringeren Erholungszeit Squash national betont. Dennoch kann basierend auf den Ergebnissen Hypothese H 1.2.1 nicht eindeutig bestätigt werden. Allerdings zeigte sich auch für die Rate an Laufaktionen eine signifikante bedeutsame Zunahme dieser mit steigender Spielstärke. Somit konnte insgesamt eine Zunahme der Aktionsrate mit steigender Spielstärke festgestellt werden.

Unabhängig von der Anzahl an Laufbewegungen schien die Auswahl geeigneter Lauftechniken im Kontext einer möglichst hohen Bewegungsökonomie und Zweckmäßigkeit auf Grund postulierter Effekte auf die kardiale und metabolische Beanspruchung zunehmend bedeutsam zu sein. In diesem Kontext konnte innerhalb dieser Arbeit zwar kein unmittelbarer Zusammenhang zwischen der dominanten Laufbewegungsart und der metabolischen Leistung sowie der kardialen und metabolischen

Ausbelastung nachgewiesen werden. Jedoch nahm die Beteiligung des aeroben Energiestoffwechsels an der Energiebereitstellung mit dem prozentualen Anteil der Sidesteps bzw. die Beteiligung des anaerob laktaziden Energiestoffwechsels mit dem prozentualen Anteil an Schritten unabhängig von der Spielstärke zu. Dies kann als Hinweis auf einen möglicherweise beanspruchungsregulierenden Effekt der Sidesteps interpretiert werden.

Hinsichtlich einer optimalen räumlichen Orientierung und zeitlich optimaler Handlungseffekte scheinen Sidesteps einen Vorteil vor Schritten darzustellen. So stellten diese mit 48 % die dominante Fortbewegungsart im Spiel dar. Vor dem Hintergrund situationsangepassten taktischen Verhaltens muss die vorherige Aussage jedoch dahingehend relativiert werden, dass auch Schritte in der Bewältigung initialer Bewegungen aus der zentralen Position sowie als Bestandteil von Antritten notwendige Bestandteile der Fortbewegung im Spiel sind (Haymann & Meseck, 1989). So stellten Schritte mit 46 % ebenfalls einen großen Teil der Laufbewegungen dar. Grundsätzlich konnte jedoch eine systematische Zunahme des prozentualen Anteils an Sidesteps mit steigender Spielstärke festgestellt werden, so dass eine durch Schritte dominierte Laufarbeit spielstärkenlimitierend erscheint. Dieser Eindruck wird zusätzlich dadurch gestärkt, dass die Probanden Squash national bei einseitiger Testung prozentual signifikant mehr Sidesteps und weniger Schritte ausführten als die Probanden Squash regional, womit Hypothese H 1.2.2 als bestätigt angesehen wird.

Die Ergebnisse dieser Arbeit bestätigen unter Einbezug der intermittierenden Belastungsstruktur auf Grund der hohen Anzahl und Rate maximal intensiver Aktionen und insbesondere sich wiederholender Antritte den Charakter als hoch intensive, intermittierende Mehrfachsprintsportart (Wilkinson et al., 2012) mit einer im Vergleich zu anderen Sportarten hohen Rate maximal intensiver Aktionen. So zeigt ein Vergleich der Ergebnisse mit denen von Cabello et al. (2002) eine mit 6,60 maximal intensiven Aktionen pro Minute der aktiven Spielzeit um annähernd 40 % höhere Rate maximal intensiver Aktionen als im Badminton.

Dabei sind sowohl die Anzahl maximal intensiver Aktionen als auch deren Frequenz spielniveautrennend. So führten die Spieler Squash national sowohl absolut als auch pro Spielminute statistisch bedeutsam mehr Aktionen maximaler Intensität wie Antritte, maximale Ausfallschritte, Sprünge und harte Richtungswechsel aus. Eine separate Betrachtung der verschiedenen erhobenen maximal intensiven Aktionen zeigte dabei mit steigendem Spielniveau insbesondere eine deutliche Zunahme von Antritten und maximalen Ausfallschritten. Kempter (2008) konnte für Badminton einen Zusammenhang zwischen der Tiefe der Ausfallschritte und der zuvor gemessenen Laufgeschwindigkeit feststellen. Diesbezüglich konnte innerhalb dieser Arbeit eine positive Korrelation zwischen der Anzahl der Antritte und der Anzahl maximaler Ausfallschritte festgestellt werden. Vor diesem Hintergrund erscheinen sowohl Antritte

als auch tiefe Ausfallschritte ein taktisches Mittel zum Erreichen schwer erreichbarer Bälle bzw. dem möglichst schnellen Überbrücken großer Distanzen zu sein. Weiter konnte Kempter (2008) zeigen, dass tiefe Ausfallschritte einen hohen exzentrischen Kraftaufwand für die Beinmuskulatur bedeuten und darüber hinaus eine hohe Anforderung an die Sehnen-Band-Struktur des vorderen Fußes stellen. Dies gibt einen Hinweis darauf, dass auch propriozeptives Training der Fuß- und Beinmuskulatur im Kontext von Verletzungsprophylaxe im Squash notwendig erscheint. Für die untereinander positiv korrelierte Anzahl an Antritten und maximalen Ausfallschritten konnte eine positive Korrelation mit der Anzahl vorne geschlagener Bälle festgestellt werden. Dies bestätigt den durch Beobachtungen gewonnen Eindruck, dass primär in die vorderen Ecken des Courts angetreten und am Ende des Antritts zur Generierung maximaler Reichweite ein tiefer bis maximaler Ausfallschritt ausgeführt wird. Eine Erklärung für den hier trennenden Effekt könnte zum einen ein offensiver geführtes Spiel auf nationalem Spielniveau und zum anderen die Notwendigkeit, in Folge einer verbesserten Schlagpräzision weitere Wege in kurzer Zeit überbrücken zu müssen, sein. Die Vermutung einer offensiveren Spieltaktik auf nationalem Spielniveau wird zusätzlich durch eine Zunahme der Anzahl gespielter Volleys, vorne gespielter Bälle sowie die Erhöhung der Schlagfrequenz mit steigender Spielstärke gestärkt.

Die Schlagverteilung zeigt unter Berücksichtigung des Nutzungsverhalten der T-Zone, dass sowohl die Spieler Squash national als auch die Spieler Squash regional für ihr Spiel den gesamten Court nutzen, beide jedoch überwiegend im hinteren Bereich des Courts spielen. Dennoch konnte im Vergleich zu den bei Vučković et al. (2013) analysierten Spielen der Herrenteamweltmeisterschaften 2003 mit 10 % vorne gespielter Bälle innerhalb dieser Arbeit unabhängig vom Spielniveau ein um 10 % höherer Anteil vorne gespielter Bälle registriert werden. Wie schon bei Hong et al. (1996) konnte auch innerhalb dieser Arbeit festgestellt werden, dass im Squash prinzipiell mehr Bälle auf der Rückhand gespielt werden. Dieses Phänomen wurde mit dem Ziel einer Bindung des Gegners in defensiver Haltung und Einschränkung von dessen Handlungsmöglichkeiten assoziiert (Hong et al., 1996).

Während hier keine statistisch bedeutsamen Unterschiede zwischen den Spielern Squash national und Squash regional gefunden werden konnten, nahm bei Hong et al. (1996) die Nutzung der bei Rechtshändern mit der linken Courtseite verbundenen Rückhand mit dem Übergang von nationalem auf internationales Spielniveau zu. Unter der Prämisse immer schneller werdender und vom Offensivspiel dominierter Partien ist auf nationalem bzw. internationalem Niveau heute prinzipiell eher eine Abnahme der Rückhandnutzung zu vermuten.

Die Anzahl registrierter Unforced Error und Winner liegt ~ 50 % bzw. ~ 15 % unterhalb des von Hughes & Robertson (1996) für Spiele auf internationalem Spiel-

niveau berichteten Durchschnitts. Die der Untersuchung von Hughes & Robertson (1996) zu Grunde liegende Definition Error und Winner kann der entsprechenden Publikation nicht entnommen werden, so dass die Größenunterschiede potentiell definitorischer Natur oder aber z. B. auf ein gesteigertes Fertigniveau der Spieler zurückzuführen sein könnten. Prozentual zur Anzahl der Punkte betrachtet entsprechen die Anzahl der Winner mit $\sim 35\%$ und die Anzahl der Unforced Error mit $\sim 18\%$ in etwa der von Hughes et al. (2009) berichteten Größenordnung.

Bei vergleichbarer Anzahl geschlagener Winner konnten Squash national systematisch weniger Unforced Error beobachtet werden. Spielniveautrennend scheint somit das Vermeiden eigener Fehler und nicht das Erzwingen eigener Punkte zu sein. Unter der Annahme primär ermüdungsbedingter Fehler könnte eine geringere physische Ausbelastung der Spieler auf nationalem Spielniveau vermutet werden. Dies konnte jedoch durch die Daten zur Beanspruchung nicht eindeutig bestätigt werden. Daneben konnten auch keine Zusammenhänge zwischen der Beanspruchung und der Anzahl geschlagener Unforced Error oder Winner nachgewiesen werden. Auch die Anzahl und Frequenz maximal intensiver Aktionen war mit der Anzahl geschlagener Unforced Error und Winner unkorreliert. Allerdings konnte eine positive Korrelation der Anzahl geschlagener Winner mit der Anzahl geschlagener Unforced Error festgestellt werden, so dass vermutet werden kann, dass ein mit dem Schlagen von Winnern assoziiertes offensives, attackierendes Agieren das Risiko eigener Fehler und somit die Notwendigkeit immer besserer technischer Fertigkeiten erhöht. Somit könnte die geringere Anzahl an Unforced Error Squash national auf eine bessere Technik und höhere Schlagpräzision auf nationalem Spielniveau zurückzuführen sein. Die Zunahme der Schlagpräzision mit steigendem Spielniveau wurde von Vučković et al. (2013) nachgewiesen.

Um ein Spiel jedoch für sich zu entscheiden, scheint derzeit das Schlagen von Winnern unabdingbar. So schlugen die Gewinner einer Partie systematisch erheblich mehr Winner pro Satz als die Verlierer. Dies kann als Hinweis auf einen Trend weg von einem durch defensives Agieren mit Warten auf den Fehler des Gegners geprägten hin zu einem offensiven Spiel, in dem die Spieler selbst die Entscheidung suchen, interpretiert werden.

Die Schlagfrequenz der Spieler entspricht bezogen auf die Schlagfrequenz in der Netto-Gesamtspielzeit in etwa der aktuellen Datenlage, ist im Vergleich zu der aus den Daten von Murray et al. (2016a) ableitbaren Schlagfrequenz in der aktiven Spielzeit von ~ 60 spm jedoch deutlich geringer. Dieser Unterschied scheint durch das höhere Spielniveau der Untersuchung von Murray et al. (2016a) erklärbar. Im Vergleich zu den berichteten Schlagfrequenzen vor oder unmittelbar nach Regeländerung sind die innerhalb dieser Arbeit gemessenen Werte als hoch zu bewerten. Folglich kann auch bezüglich der Schlagfrequenz eine generelle Zunahme des Spieltempos mit

steigendem Spielniveau und insgesamt spielniveauunabhängig seit Änderung des Regelwerks vermutet werden.

Auch die Schlagfrequenz stellt eine zwischen den beiden untersuchten Spielniveaus trennende Größe dar. So lag die Schlagfrequenz Squash national statistisch bedeutsam über der Squash regional. Darüber hinaus konnte eine systematische Zunahme der Schlagfrequenz mit steigender Spielstärke nachgewiesen werden. Im Vorfeld wurde vermutet, dass eine höhere Schlagfrequenz dadurch bedingt sein könnte, dass mehr Bälle direkt gespielt werden. Diesbezüglich konnte jedoch kein Zusammenhang zwischen der Schlagfrequenz mit der Anzahl volley geschlagener Bälle nachgewiesen werden. Dies lässt vermuten, dass die höhere Schlagfrequenz Squash national durch eine höhere Laufgeschwindigkeit induziert ist. Betrachtet man vor dem Hintergrund dieser Vermutung die Aktionsrate der unteren Extremitäten, so konnte jedoch trotz eines höheren Wertes Squash national kein statistisch bedeutsamer Unterschied festgestellt werden. Bei Betrachtung aller Spieler zeigte sich allerdings eine Zunahme der Aktionsrate der unteren Extremitäten mit steigender Spielstärke, so dass generell eine sukzessive Zunahme der Bewegungsgeschwindigkeit mit steigender Spielstärke vermutet werden kann.

Die Ergebnisse zum Nutzungsverhalten der T-Zone dieser Arbeit liegen trotz Erweiterung der T-Zone (s. Kapitel 11.3.2) weit unterhalb der von Vučkovič et al. (2004, 2009) berichteten Werte. Während bei Vučkovič et al. (2004) die Spieler nationalen und internationalen Spielniveaus sich $\sim 40\%$ der aktiven Spielzeit innerhalb der T-Zone befanden und diese mehr als 90 mal bei Ausführung des gegnerischen Schlages in T-Position registriert werden konnten, konnte innerhalb dieser Studie unabhängig vom Spielniveau lediglich eine bei ~ 71 rechtzeitigen T-Erreichungen aus ~ 54 Standzeitpunkten ergebende kumulierte Standzeit von $\sim 10\%$ der aktiven Spielzeit festgestellt werden. Bei potentiell weniger als 90 Standzeitpunkten und einer kumulierten Standzeit von ca. 170 s kann aus den Daten von Vučkovič et al. (2004) eine durchschnittliche Standzeit von annähernd 2 s abgeleitet werden. Dies erscheint vor dem Hintergrund sämtlicher Beobachtungen und vor allem hinsichtlich einer auf dem Niveau zu erwartenden durchschnittlichen Dauer der Ballwechsel von ca. 13 s (Murray et al. 2016a) überproportional lang. Die 2004 publizierten Daten zur Standzeit innerhalb der T-Zone wurden 2009 nochmal auf $\sim 50\%$ erhöht (Vučkovič et al., 2009). In dieser Publikation lassen sich jedoch auch Hinweise auf die potentielle Ursache für die hohen Werte bei Vučkovič et al. (2004, 2009) finden. So wird in der Methodik beschrieben, dass von einem Computerprogramm jeder Aufenthalt eines Spielers innerhalb der vorher definierten T-Zone erfasst wurde und die Formulierung von Standzeit in T-Position in Aufenthaltszeit innerhalb der T-Zone geändert. Da viele, vor allem die volley geschlagenen Bälle in der Spielfeldmitte und somit innerhalb des als T-Zone definierten Bereichs geschlagen werden, wird für diese Aktionen die

T-Zone gar nicht verlassen. Vor diesem Hintergrund kann vermutet werden, dass solche oder ähnliche Aktionen bei Vučković et al. (2004) der T-Zonenstandzeit zugerechnet wurden. Obwohl somit ein Vergleich der Ergebnisse zur Standzeit in situativer T-Position mit der bisherigen Datenlage nicht plausibel ist, scheint die innerhalb dieser Arbeit gemessene durchschnittliche Nutzungshäufigkeit unter Berücksichtigung der aktiven Spielzeit generell mit der von Vučković et al. (2004) publizierten Anzahl an rechtzeitigen T-Erreichungen vergleichbar.

Wie bei Vučković et al. (2009) konnte eine systematische Zunahme der Standzeit im Vergleich von regionalem mit nationalem Spielniveau festgestellt werden. Auch hinsichtlich der Häufigkeit der T-Erreichungen konnte ein deutlicher, wenn auch auf Grundlage der erhobenen Daten nicht als systematisch einstuftbarer Unterschied gleicher Tendenz zwischen den Spielniveaus registriert werden. Wie im Vorfeld vermutet scheint das Nutzungsverhalten der T-Zone ebenfalls eine zwischen den beiden untersuchten Spielniveaus trennende Größe zu sein, womit Hypothese H 1.2.3 als bestätigt angesehen wird. Darüber hinaus konnte auch eine Zunahme von Nutzungshäufigkeit der T-Zone sowie der Standzeit innerhalb dieser mit steigender Spielstärke festgestellt werden. Unter der Prämisse einer mit der T-Zonennutzung verbundenen Spieldominanz scheint diese auf den ersten Blick mit steigender Spielstärke zunehmend an Bedeutung zu gewinnen. Berücksichtigt man jedoch, dass hinsichtlich der Nutzung der T-Zone keine systematischen Unterschiede zwischen Gewinnern und Verlierern festgestellt werden konnten, so scheint die Nutzung der T-Zone auf hohem Spielniveau primär eine notwendige Voraussetzung zu sein, um die mit hoher Präzision im ganzen Court verteilten Bälle des Gegners erreichen zu können. Vučković et al. (2013) konnten in diesem Zusammenhang zeigen, dass auch die Variation an Schlagtechniken sowie die Streuung der Bälle auf dem Court zumindest teilweise von der Zeit bis zur Ausführung eines Schlages abhängt. Längere Standzeiten auf dem T können vor diesem Hintergrund als Zeichen einer potentiell größeren Schlagvariation interpretiert und als vorteilhaft bewertet werden. Kempter (2008) assoziiert eine unpräzise Spielweise wiederum mit Zeitdruck im Spiel, der sich beispielsweise durch eine geringere Vorbereitungszeit in situativ zentraler Position äußert. Die dadurch hohen Laufgeschwindigkeiten und hohen positiven und negativen Beschleunigungen können zu einer kardialen und metabolischen Mehrbeanspruchung führen. In diesem Kontext konnte eine negative Korrelation zwischen der metabolischen Leistung und der durchschnittlichen Standzeit in situativer T-Position nachgewiesen werden.

Hingegen vorheriger Vermutungen sowie der Ergebnisse vorheriger Studien konnten mit Ausnahme der bereits erwähnten unterschiedlichen Anzahl geschlagener Winner keine weiteren Unterschiede hinsichtlich der Aktivitäten von Gewinnern und Verlierern festgestellt werden, so dass die Hypothesen H 1.3.1 und H 1.3.2 nicht bestätigt werden konnten. Insgesamt scheint die hier durchgeführte Aktivitätsanalyse

nicht differenziert genug, um in spielstärkenhomogenen Paarungen Unterschiede zwischen Gewinnern und Verlierern identifizieren zu können. Möglicherweise könnte eine Analyse einzelner Ballwechsel und somit eine Fokusverschiebung hin zu den Gewinnern und Verlierern dieser zu neuen Erkenntnissen führen. Dies gilt es, zum Thema nachfolgender Untersuchungen zu machen.

22.3 Beanspruchung

Das beobachtete Verhalten von Sauerstoffaufnahme und Herzfrequenz im Spiel bestätigt die Beobachtungen von Girard et al. (2007) und erscheint generell physiologisch. Während die Herzfrequenz nach anfänglich steilem Anstieg lediglich geringen Schwankungen unterworfen ist, ist bei Betrachtung der Sauerstoffaufnahme während der einzelnen Sätze generell nach ebenfalls initial rapidem Anstieg ein deutlich oszillierendes Verhalten festzustellen, welches primär die Belastung in den Ballwechseln, den Pausen zwischen den Ballwechseln sowie den Satzpausen widerzuspiegeln scheint. Dies ist in Übereinkunft mit den Ergebnissen zum Verhalten von Sauerstoffaufnahme und Herzfrequenz bei Intervallbelastungen vergleichbarer Struktur (Trapp et al., 2007), wobei jedoch im Squash insbesondere hinsichtlich der Sauerstoffaufnahme deutlichere Schwankungen zu beobachten sind. Diesbezüglich kann vermutet werden, dass es in Folge wechselnder Aktionen verschiedener Intensität auch innerhalb der Belastungsphasen verstärkt durch kurzzeitige Belastungspausen zu rapiden Änderungen des Sauerstoffbedarfs in der Muskulatur kommt, wodurch sich im Spiel eine ständig schwankende Sauerstoffaufnahme ergibt. Die Herzfrequenz scheint diesbezüglich eine stärkere Anpassungsträgheit zu zeigen. Faktisch lässt sich dies indirekt z. B. durch hoch signifikante positive Korrelationen der relativen Sauerstoffaufnahme mit der durchschnittlichen Anzahl der Schläge pro Ballwechsel sowie der durchschnittlichen Dauer der Ballwechsel und keine Korrelation dieser Prädiktoren mit der Herzfrequenz bestärken.

Die innerhalb dieser Studie gemessene durchschnittliche relative Sauerstoffaufnahme ($43,62 \text{ ml kg}^{-1} \text{ min}^{-1}$) entsprach 79 % des innerhalb der Laufbandspiroergometrie ermittelten Maximums und 96 % der relativen Sauerstoffaufnahme an der fixen anaeroben Schwelle. Die durchschnittliche Herzfrequenz (166,83 bpm) lag einer kardialen Ausbelastung von 90 % der HR_{max} entsprechend im Mittel mit 101 % leicht oberhalb der im Laufbandstufentest ermittelten anaeroben Schwellenherzfrequenz. Somit kann die durchschnittliche Belastungsintensität im Squash ohne Berücksichtigung der intermittierenden Belastungsstruktur nach Kindermann (2004) als intensiv eingestuft werden. Hypothese H 2.1 kann folglich als bestätigt angesehen werden.

Aus dem schwankenden Verhalten der Sauerstoffaufnahme über die Gesamtspielzeit kann jedoch abgeleitet werden, dass die durchschnittliche Sauerstoffaufnahme

innerhalb der aktiven Spielzeit über der insgesamt gemessenen durchschnittlichen Sauerstoffaufnahme liegen muss. Bei Veranschlagung einer durchschnittlichen prozentualen Abnahme der Sauerstoffaufnahme in den im Mittel 0,16 min langen Pausen zwischen den Ballwechseln approximiert durch die Abnahme der Sauerstoffaufnahme in der durchschnittlichen EPOC der Nachbelastung aller Probanden (s. Kapitel 16.4) kann die durchschnittliche Sauerstoffaufnahme in der durchschnittlich $\sim 55\%$ der Netto-Gesamtspielzeit ausmachenden aktiven Spielzeit auf $\sim 45 \text{ ml kg}^{-1} \text{ min}^{-1}$ geschätzt werden. Dies entspricht $\sim 103\%$ der durchschnittlichen Sauerstoffaufnahme der Netto-Gesamtspielzeit und 82% der $\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$ sowie 97% der $\dot{V}\text{O}_{2\text{BLC4}}$. Auf Basis dieser Modellierung kann folglich auch in der aktiven Spielzeit eine als intensiv einzustufende durchschnittliche Belastungsintensität vermutet werden.

Bei Vergleich von durchschnittlicher Herzfrequenz und durchschnittlicher Sauerstoffaufnahme im Spiel mit der Relation von Sauerstoffaufnahme und Herzfrequenz bei sukzessiver Belastungssteigerung fällt in Übereinkunft mit den Ergebnissen von Girard et al. (2007) auf, dass die kardiale Beanspruchung überproportional hoch ist. Ein Vergleich der Relation von Sauerstoffaufnahme und Herzfrequenz innerhalb der Laufbandspiroergometrie und im Spiel zeigt hier eine um 6% höhere Herzfrequenz im Spiel. Ursächlich hierfür könnte eine einer hohen Anspannung im Wettkampf geschuldete erhöhte Sympathikusaktivität sein (Hurley et al., 1989). Das gemeinsame Agieren auf einem Spielfeld scheint diesen Effekt potentiell zu verstärken. Unabhängig von einer möglicherweise gesteigerten Sympathikusaktivität konnten Baum et al. (1997) zeigen, dass eine Schätzung der Sauerstoffaufnahme basierend auf der Herzfrequenz bei Intervallbelastungen von 10 s mit 10 s Pause zu einer Überbewertung der Sauerstoffaufnahme um $0,5 \text{ l min}^{-1}$ führt. Omosegaard (1996) vermutet diesbezüglich, dass die im Verhältnis zur Herzfrequenz geringe Sauerstoffaufnahme bei intervallförmigen Belastungen teilweise durch die Funktion des Myoglobins als Sauerstoffspeicher bedingt ist (s. Kapitel 6.2.5). Kempster (2008) konnte ein vergleichbares Verhalten von Sauerstoffaufnahme und Herzfrequenz im Badminton beobachten. Sie führte die in Relation zur Sauerstoffaufnahme hohe Herzfrequenz primär auf eine durch die häufige Armarbeit über Kopf beim Schlagen erhöhte Sympathikusaktivität zurück (Kempster, 2008). Bei der vergleichsweise geringen Anzahl von Schlägen über Kopf im Squash scheint dieser Effekt hier jedoch vernachlässigbar.

Das Verhalten der Blutlaktatkonzentration gemessen an der Post-Belastung-Blutlaktatkonzentration bleibt im Spielverlauf nach einem initial rapiden Anstieg im ersten Satz bis zum Spielende annähernd konstant. Dies entspricht dem bereits u. a. von Leyk et al. (1996) beschriebenen Verhalten und verstärkt den Eindruck einer untergeordneten Bedeutung des anaerob laktaziden Energiestoffwechsels. Diesbezüglich kann auf Basis der bisherigen Datenlage zur Energiebereitstellung bei

intermittierender Belastung (s. Kapitel 6.2.5) vermutet werden, dass es im Squash bedingt durch die durchschnittlich hohe Belastungsintensität nahe der anaeroben Schwelle mit einzelnen Belastungsspitzen jenseits der anaeroben Schwelle nach wenigen Belastungsspitzen durch vermehrte intrazelluläre Laktatanhäufung zu einer Inhibition der Glykolyse kommt, welche einer weiteren (deutlichen) Blutlaktatakkumulation entgegengewirkt. Diese Inhibition scheint jedoch bei ausreichender Laktatelimination in den Erholungsphasen temporär wieder aufhebbar, so dass je nach Dauer und Intensität der Belastungs- sowie Dauer der Erholungsphasen unterschiedlich hohe Post-Belastung-Blutlaktatkonzentrationen zu beobachten sind. Während wider der Vermutung von Girard et al. (2007) kein systematischer Zusammenhang zwischen der Anzahl langer bzw. sehr langer Ballwechsel und der Post-Belastung-Blutlaktatkonzentration beobachtet werden konnte, zeigte sich diese stark positiv mit der durchschnittlichen metabolischen und kardialen Ausbelastung korreliert, für welche ein systematischer positiver Zusammenhang mit der mittleren Ballwechseldauer festgestellt werden konnte. Die durchschnittliche Post-Belastung-Blutlaktatkonzentration von $5,53 \text{ mmol l}^{-1}$ liegt innerhalb der für Squash berichteten Range und entspricht annähernd der nach Wonisch et al. (2017) bei hoch intensiven Intervallbelastungen mit 30-sekündigen Belastungs- bei doppelt so langen Erholungsphasen zu erwartenden Blutlaktatkonzentration. Unter Berücksichtigung der zeitlichen Belastungsstruktur im Squash scheint diese Vergleichbarkeit potentiell durch eine hohe durchschnittliche Belastungsintensität in den Ballwechseln, vereinzelt langen bis sehr langen Belastungsspitzen und eine durchschnittlich kürzere Erholungsphase erklärbar.

Bei Vergleich der beiden untersuchten Spielniveaus stellt die durchschnittliche Sauerstoffaufnahme eine stark trennende Größe dar. So nahm die durchschnittliche Sauerstoffaufnahme auf höherem Spielniveau statistisch signifikant um 13 % zu. Bewertet an den im Laufbandstufentest ermittelten Maximal- und Schwellenwerten entsprach die gruppenspezifische durchschnittliche Sauerstoffaufnahme jedoch einer vergleichbaren metabolischen Ausbelastung, wobei eine nicht als systematisch einstuftbare, leicht höhere metabolische Ausbelastung der Spieler Squash regional festgestellt werden konnte.

Ebenfalls konnte eine systematisch höhere durchschnittliche Herzfrequenz seitens der Spieler Squash national bei systematisch geringerer kardialer Ausbelastung gefunden werden, welche sich auch in einem etwas geringeren, jedoch nicht als systematisch einzustufenden subjektiven Beanspruchungsempfinden widerspiegelt. Dabei scheint der im Vergleich zur Sauerstoffaufnahme deutlichere Effekt der höheren durchschnittlichen Herzfrequenz auf Grund der negativen Korrelationen von Alter und Herzfrequenz primär durch das deutlich geringere Durchschnittsalter der Probanden Squash national erklärbar, wohingegen die höhere kardiale Ausbelastung

Squash regional als Zeichen einer generell leicht höheren physischen Ausbelastung möglicherweise verstärkt durch eine schlechtere Herzkreislaufökonomie zu interpretieren ist, was vor dem Hintergrund einer systematisch stark geringeren aeroben Leistungsfähigkeit der Spieler Squash regional mit aus der Relation von Sauerstoffaufnahme und Herzfrequenz innerhalb der Laufbandspiroergometrie ableitbarer schlechterer Herzkreislaufökonomie (s. Kapitel 22.6.1) plausibel erscheint. Darüber hinaus konnte eine hoch signifikante deutliche negative Korrelation zwischen der aeroben Leistungsfähigkeit und der physischen und insbesondere der kardialen Ausbelastung nachgewiesen werden. Somit kann Hypothese H 2.2.1 auf Basis der Ergebnisse eindeutig bestätigt werden, wohingegen Hypothese H 2.2.3 hinsichtlich der kardialen Ausbelastung zwar ebenfalls bestätigt, hinsichtlich der metabolischen Ausbelastung jedoch trotz einer Bestätigung der im Vorfeld vermuteten Tendenz vor dem Hintergrund eines geringen, nicht signifikanten Mittelwertunterschieds auf Basis der Ergebnisse dieser Arbeit verworfen werden muss. Dennoch erscheint die insgesamt geringere physische Ausbelastung der Probanden Squash national vor dem Hintergrund einer gemessen an der Effektstärke in Relation zur metabolischen Leistung überproportional steigenden aeroben Leistungsfähigkeit plausibel.

Unter Berücksichtigung der nachgewiesenen Abhängigkeit der Post-Belastung-Blutlaktatkonzentration von der physischen Ausbelastung erscheint auch die wider vorheriger Vermutung (Hypothese H 2.2.2) Squash regional höhere durchschnittliche Post-Belastung-Blutlaktatkonzentration physiologisch, wobei auch dieser Unterschied statistisch nicht eindeutig trennend erscheint. Diesbezüglich weisen die Ergebnisse insgesamt darauf hin, dass die Post-Belastung-Blutlaktatkonzentration sich aus der Belastungsintensität einzelner Ballwechsel sowie deren Dauer ergibt und somit nicht als systematisch trennende Größe einzustufen ist, sondern vielmehr die Umkämpftheit einer Partie widerspiegelt. So sind in engen, umkämpften Begegnungen längere Ballwechsel höherer Intensität zu erwarten. Dies scheint eine Erklärung für die große Spannweite der bisher berichteten Blutlaktatkonzentrationen im Squash zu sein. Weiter kann jedoch unter Berücksichtigung der bisherigen Erkenntnisse zur Energiebereitstellung bei hoch- bis maximal intensiver intermittierender Belastung vermutet werden, dass die Post-Belastung-Blutlaktatkonzentration durch die beschriebene Inhibition der Glykolyse nach längerer Überschreitung des maximalen Laktat-Steady-States nach oben begrenzt wird.

Die berichteten starken Effekte einer hohen kardialen Ausbelastung können als Indiz dafür interpretiert werden, dass neben einer möglichst hohen $\dot{V}O_{2\max}$ und möglichst hohen anaeroben Schwelle im Squash eine möglichst gute Herzkreislaufökonomie bedeutsam sein könnte. Diesen Gedanken weiter verfolgt kann vermutet werden, dass sich eine Verbesserung der Herzkreislaufökonomie im Sinne einer gesteigerten kardiopulmonalen Leistungsreserve und Anpassungsgeschwindigkeit auf Belastungsänderungen positiv auf die Energiebereitstellung auswirken könnte.

Die kardiale Beanspruchung ist im Vergleich zu früheren Forschungsergebnissen als hoch zu bewerten. Girard et al. (2007) stellten mit 92 % der HR_{max} eine unmittelbar vergleichbare kardiale Ausbelastung fest. Die durchschnittliche Sauerstoffaufnahme ist im Vergleich mit den Ergebnissen von Girard et al. (2007) jedoch annähernd 20 % geringer ($54,4 \text{ ml kg}^{-1} \text{ min}^{-1}$). Da der Probandenpool bei Girard et al. (2007) aus englischen Elitespielern bestand, erscheint hier auf Grund der bereits dargestellten systematisch höheren durchschnittlichen Sauerstoffaufnahme mit steigendem Spielniveau im Kontext einer möglichst hohen Vergleichbarkeit eine Einschränkung auf die Daten Squash national sinnvoll. Doch auch die durchschnittliche Sauerstoffaufnahme der Probanden Squash national ist $\sim 15 \%$ geringer als bei Girard et al. (2007). Dies scheint vor dem Hintergrund der nachgewiesenen positiven Korrelationen von Spielstärke und Belastung sowie Belastung und metabolischer Leistung zum Teil durch die höhere Spielstärke der Probanden von Girard et al. (2007) begründet, welche im Gegensatz zur getesteten deutschen Elite im Untersuchungszeitraum allesamt an internationalen Turnieren der PSA teilnahmen. Betrachtet man die durchschnittliche Sauerstoffaufnahme bei Girard et al. (2007) jedoch zusätzlich in Relation zu den bei Girard et al. (2005) der Probandengruppe zuzuordnenden Sauerstoffaufnahme am respiratorischen Kompensationspunkt (RCP), so entsprach diese durchschnittlich 94 % der $\dot{V}O_{2RCP}$. Damit liegt auch die durchschnittliche metabolische Ausbelastung unter der Prämisse der Vergleichbarkeit von respiratorischem Kompensationspunkt und fixer anaerober Schwelle über der innerhalb dieser Arbeit festgestellten. Dies scheint sich ebenfalls in höheren durchschnittlichen Post-Belastung-Blutlaktatkonzentrationen ($8,3 \text{ mmol l}^{-1}$) widerzuspiegeln. Einen Hinweis auf eine mögliche Ursache hierfür liefert ein Vergleich der temporalen Belastungsstruktur. Hier berichten Girard et al. (2007) eine um annähernd 40 % höhere durchschnittliche Ballwechseldauer und eine um ca. 15 % höhere effektive Spielzeit. Auch konnten innerhalb der Untersuchungen dieser Arbeit ca. 16 % weniger lange Ballwechsel als bei Girard et al. (2007) registriert werden. Diesbezüglich kann insbesondere ein beanspruchungssteigernder Effekt des prozentualen Anteils sehr langer Ballwechsel bei durchschnittlich kürzeren Erholungsphasen vermutet werden, welche in einer höheren durchschnittlichen Ballwechseldauer sowie einer höheren effektiven Spielzeit ihren Ausdruck finden. Da bereits erläutert, dass die temporale Belastungsstruktur die heutige Belastung im Squash nicht mehr ausreichend widerspiegelt, scheint folglich auch das Beanspruchungsprofil von Girard et al. (2007) nicht mehr repräsentativ für die aktuelle Beanspruchung im Squash zu sein.

Die vergleichsweise sehr hohe durchschnittliche Beanspruchung bei Girard et al. (2007) gibt einen möglichen Hinweis darauf, warum sich die Belastungsstruktur seit der Umstellung des Zählsystems bis heute hin zu einer deutlich kürzeren durch-

schnittlichen Ballwechseldauer und einer deutlich geringeren effektiven Spielzeit entwickelt hat. Da die Untersuchung von Girard et al. (2007) zeitnah nach der Umstellung erfolgte, kann vermutet werden, dass die Taktik sowie das Bewegungsverhalten der Spieler auf dem Court noch nicht an das neue Zählssystem angepasst waren. Ein Übertrag gewohnter Taktiken und Verhaltensmuster auf das „neue Spiel“ könnten so zunächst zu einer Belastungsstruktur geprägt durch viele lange, hoch intensive Ballwechsel geführt haben, in deren Konsequenz es im Spielverlauf zu deutlichen Leistungseinbußen kam. So konnte im Gegensatz zu den Ergebnissen dieser Arbeit (s. Kapitel 16.1.1) eine systematische Abnahme der durchschnittlichen Sauerstoffaufnahme im Spielverlauf bei gegen Ende sogar abnehmender Post-Belastungs-Blutlaktatkonzentration festgestellt werden. Weiter kann spekuliert werden, dass zur Vermeidung einer Reduktion der Leistungsfähigkeit im Spielverlauf im Laufe der Jahre eine Ökonomisierung des Spielverhaltens hinsichtlich einer Beanspruchungsreduktion erfolgt ist.

22.4 Energiebereitstellung

Die Ergebnisse dieser Arbeit ermöglichen eine erste Beschreibung des Gesamtenergiebedarfs unter Berücksichtigung der anaeroben ATP-Resynthese sowie der anteiligen Energiebereitstellung im Squash. Obwohl Squash durchschnittlich einer hohen und phasenweise bedingt durch eine hohe Aktionsrate und insbesondere eine hohe Rate maximal intensiver Aktionen vermutlich einer sehr hohen Energieflussrate bedarf, zeigen die Ergebnisse dieser Arbeit, dass die Energiebereitstellung im Squash dominant aerob erfolgt. So lag die per konservativen Berechnungsmodell ohne Berücksichtigung der netto-spielzeitinkludierten Belastungspausen berechnete Beteiligung des aeroben Energiestoffwechsels bei $\sim 90\%$, wohingegen die anaerobe Energiebereitstellung mit $\sim 8\%$ alaktazid und $\sim 2\%$ laktazid lediglich $\sim 10\%$ der Energiebereitstellung ausmachte. Dies entspricht der anteiligen Energiebereitstellung bei Langzeitausdauerbelastungen vergleichbarer Intensität, jedoch mit einer leicht höheren Beteiligung der anaeroben Energiestoffwechselwege (Neumann, 1984), was vor dem Hintergrund einzelner Belastungsspitzen sowie der Erholungsphasen in den Satzpausen plausibel erscheint. Jedoch wurde im Vorfeld bereits angemerkt, dass die konservative Berechnungsmethode auf Grund der fehlenden Berücksichtigung der Pausen zwischen den Ballwechseln als Regenerationsphasen für die anaeroben Stoffwechselkomponenten die tatsächliche Beteiligung der Energiestoffwechsel im Squash nicht adäquat widerspiegelt, was durch die aufgezeigte metabolische Vergleichbarkeit mit Langzeitausdauerbelastungen gestützt erscheint. Unter Berücksichtigung dieser zusätzlichen Phasen der Kreatinphosphatresynthese und Laktatelimination erhöht sich der Anteil des anaerob alaktaziden Energiestoffwechsels auf $\sim 34\%$. Die Beteiligung des anaerob laktaziden Energiestoffwechsels

liegt auch nach Modellerweiterung lediglich bei $\sim 3\%$. Hypothese H 3.1 und H 3.2 können folglich auf Basis der Ergebnisse bestätigt werden.

Die anteilige Energiebereitstellung im Squash scheint nach aktueller Datenlage annähernd mit der eines hoch intensiven Intervalltrainings (HIIT) vergleichbar. So konnten Panissa et al. (2018) zeigen, dass die Energie bei einem hoch intensiven Intervalltraining bestehend aus zehn 1-minütigen Belastungsintervallen bei einer Laufgeschwindigkeit von $\dot{V}O_{2\max}$ auf dem Laufband gefolgt von einer 1-minütigen passiven Erholungsphase zu 68 % aerob und zu 32 % anaerob bereitgestellt wird. Obwohl innerhalb dieser Studie keine differenzierte Betrachtung der beiden anaeroben Energiestoffwechsel erfolgt ist, kann aus dem berichteten Deltalaktat von $5,6 \text{ mmol l}^{-1}$ eine vergleichbar geringe Beteiligung des laktaziden Energiestoffwechsels abgeleitet werden. Dies ist in Übereinkunft mit der bisherigen Studienlage zur Energiebereitstellung bei hochintensiven intermittierenden Belastungen (s. Kapitel 6.2.5), die bei Belastungen solcher Art eine in Abhängigkeit von Dauer und Intensität mehr oder weniger schnelle enzymatische Hemmung der Glykolyse beschreibt. Die leicht höhere Beteiligung des anaerob alaktaziden Stoffwechsels an der Energiebereitstellung im Squash erscheint darüber hinaus vor dem Hintergrund der zeitlichen Belastungsstruktur und dem exponentiellen Verlauf der Kreatinphosphat-resynthese plausibel. Ein hoher Belastungsumfang scheint jedoch auch im Squash eine zunehmend aerobe Energiebereitstellung zu begünstigen. Dies erscheint vor dem Hintergrund einer auf Grund nicht ausreichender Erholungszeit sukzessiven Leerung der Kreatinphosphatspeicher mit zunehmender Spielzeit schlüssig.

Die bei Girard et al. (2007), Wilkinson et al. (2012) und aktuell von Jones et al. (2018) postulierte hohe Beteiligung des anaerob laktaziden Energiestoffwechsels kann folglich auf Basis der Ergebnisse dieser Arbeit nicht bestätigt werden. Allerdings scheint auf Grund der intermittierenden Belastungsstruktur mit einer Belastung-Pause-Relation von $\sim 1 : 1$ und der durch die Größe des Spielfeldes auf wenige Sekunden begrenzten Dauer maximal intensiver Belastungen energetisch eine hohe Interaktion zwischen dem anaerob alaktaziden und aeroben Energiestoffwechsel in der Form zu bestehen, dass die Energie in kurzen hoch intensiven Belastungsphasen überwiegend durch Aufspaltung des in der Muskulatur gespeicherten Kreatinphosphats bereitgestellt wird, welches in den anschließenden Belastungspausen in Abhängigkeit der Erholungsdauer und der Geschwindigkeit der Sauerstoffkinetik der Nachatmung fraktional aerob resynthetisiert wird. Da die Geschwindigkeit der Sauerstoffkinetik der Nachatmung wie im Theorieteil dargelegt wesentlich durch die aerobe Leistungsfähigkeit bestimmt wird, betonen die Ergebnisse somit erneut die hohe Bedeutung einer möglichst gut ausgebildeten aeroben Leistungsfähigkeit im Squash.

Insgesamt scheint mit Blick auf die potentiell hohe Bedeutung einer schnellen Regeneration sowie des beschriebenen erwarteten Inhibitionsmechanismus hinsichtlich

der Glykolyse im Squash eine Slow-Twitch-Faser dominierte Muskelfaserverteilung notwendig bzw. insbesondere ein zu hoher Anteil an Fast-Twitch-Fasern nachteilig zu sein.

Denn obwohl Fast-Twitch-Fasern eine schnellere Energieflussrate ermöglichen als Slow-Twitch-Fasern, sind sie doch hinsichtlich ihrer aeroben Leistungsfähigkeit sowie insbesondere der PCr-Resynthese den roten Muskelfasern unterlegen (Ribbecke, 2018). Tesch et al. (1989) konnten diesbezüglich beispielsweise zeigen, dass nach einer Pause von 60 s in Folge von 30 maximal intensiven Kniebeugen 50 % des PCr in Fast- und 68 % des Kreatinphosphats in Slow-Twitch-Fasern resynthetisiert waren. Unter dem Aspekt eines steigenden Spieltempos und einem möglicherweise zunehmenden Anteil maximal intensiver Aktionen scheint jedoch im Gegensatz zu früher im modernen Squash insbesondere mit steigendem Spielniveau zunehmend auch ein höherer Anteil an Fast-Twitch-Fasern notwendig, um situativ eine hohe Energieflussrate zu ermöglichen. Dieser Trend wird durch die Ergebnisse der Nebenuntersuchung bestätigt (s. Kapitel 17.2).

Die Gesamtnettoenergiemenge von $6208,69 \text{ J kg}^{-1}$ entspricht unter Berücksichtigung der Satzdauer einer gewichtsbezogenen metabolischen Leistung von $15,28 \text{ W kg}^{-1}$. Der sich daraus ergebende stündliche Energiebedarf von $4309,20 \text{ kJ h}^{-1}$ bzw. $\sim 1000 \text{ kcal h}^{-1}$ liegt $\sim 27 \%$ über dem von Montpetit et al. (1977) und $\sim 13 \%$ unter dem von Girard et al. (2007) berichteten Wert. Da in beiden Studien der Beitrag der anaeroben Energiestoffwechsel nicht berücksichtigt wurde, kann auf der Grundlage der Ergebnisse dieser Arbeit von einer potentiellen Unterbewertung des innerhalb der beiden Studien berichteten Energiebedarfs von ca. 10 % ausgegangen werden, was jedoch die Einordnung der Ergebnisse dieser Arbeit nicht verändert. In Kapitel 5.2 wurde abgeleitet aus der durchschnittlichen Sauerstoffaufnahme bereits auf eine Zunahme der metabolischen Leistung im Laufe der Jahre und insbesondere nach Einführung der neuen Zählweise verwiesen, so dass generell ein von Montpetit et al. (1977) beschriebener geringerer Energiebedarf nicht verwunderlich erscheint. Unter Berücksichtigung der bei Girard et al. (2007) berichteten deutlich höheren durchschnittlichen Sauerstoffaufnahme erscheint hier trotz Vernachlässigung der Energiebeiträge der anaeroben Energiestoffwechsel die höhere Bewertung des Arbeitsumsatzes im Vergleich zu den Ergebnissen von Montpetit et al. (1977) sowie den Ergebnissen dieser Arbeit plausibel. Da innerhalb dieser Arbeit darüber hinaus eine Zunahme der metabolischen Leistung mit steigender Spielstärke nachgewiesen werden konnte, scheint der höhere Arbeitsumsatz bei Girard et al. (2007) zumindest auch teilweise durch die höhere Spielstärke der Probanden begründet zu sein.

Der Vergleich der getesteten Spielniveaus zeigt eine für die Sportart Squash spielniveauunabhängige anteilige Energiebereitstellung, wohingegen die metabolische

Leistung spielniveautrennend ist. So konnten im konservativen Modell für die prozentualen Anteile der einzelnen Energiestoffwechsel keine systematischen Unterschiede in Abhängigkeit des Spielniveaus festgestellt werden. Die metabolische Leistung der Spieler Squash national war jedoch systematisch deutlich höher als die der Probanden Squash regional. Folglich kann Hypothese H 3.3.1 auf Basis der Ergebnisse bestätigt werden. Jedoch zeigte sich bei weiterer Analyse insbesondere eine systematische Zunahme der Beteiligung der aeroben Energiebereitstellung sowie eine systematische Abnahme des anaerob laktaziden Energieanteils mit steigender Spielstärke, die sich tendenziell auch im Vergleich der anteiligen Energiebereitstellung in Abhängigkeit des Spielniveaus wiederfinden ließen. Somit scheint die geringere Trennung hinsichtlich der metabolischen Leistung im Vergleich zur durchschnittlichen Sauerstoffaufnahme zum Teil durch eine insgesamt höhere Beteiligung der anaeroben Energiestoffwechsel an der Energiebereitstellung Squash regional relativiert. Während im konservativen Modell keine signifikanten Unterschiede in Abhängigkeit des Spielniveaus gefunden werden konnten, zeigten sich im erweiterten systematische Effekte. So war bei den Spielern Squash national wie im Vorfeld vermutet (H 3.3.2) der Anteil des aeroben Energiestoffwechsels, bei den Spielern Squash regional der anaerobe Anteil und insbesondere der anaerob laktazide Anteil an der Energiebereitstellung signifikant und deutlich höher. Dies erscheint vor dem Hintergrund der nachgewiesenen positiven Korrelation der Post-Belastung-Blutlaktatkonzentration mit der kardialen Ausbelastung und des diesbezüglich bereits diskutierten Unterschieds in Abhängigkeit des Spielniveaus sowie der starken Abhängigkeit der anteiligen Energiebereitstellung von der Gesamtspielzeit bei mit der Spielstärke zunehmender TPT plausibel. Auch konnte eine systematische Zunahme der Beteiligung des aeroben Energiestoffwechsels bei systematischer Abnahme der Beteiligung der anaeroben Energiestoffwechsel und insbesondere des anaerob laktaziden Energiestoffwechsels mit steigender aerober Leistungsfähigkeit nachgewiesen werden, die ihrerseits eine spielniveautrennende Größe darstellt. Die Deutlichkeit der Unterschiede im erweiterten Modell scheint jedoch zum Teil durch die Art der Modellierung bedingt. So wurde der Berechnung der Kreatinphosphatresynthese und Laktatelimination in den Pausen zwischen den Ballwechseln die mittlere Modellfunktionen der schnellen Komponente der EPOC sowie der Laktatabfallkinetik der Nachbelastung, der Pausendauer sowie die mittlere Anzahl der Pausen im Satz zu Grunde gelegt. Trotz fehlender statistischer Signifikanz und Einstufung der Größe der einzelnen Unterschiede in Abhängigkeit des Spielniveaus für diese Variablen als inhaltlich nicht relevant, könnte diese in Kombination eine Überbewertung der Beteiligung der anaeroben Energiestoffwechsel Squash regional bedingen. Insgesamt müssen die gefundenen systematischen Unterschiede im erweiterten Modell auf Grund des hohen Modellierungsgrades als kritisch und nicht ausreichend aussagekräftig eingestuft werden, um Hypothese H 3.3.2 als bestätigt zu betrachten. Jedoch spiegeln auch sie die Tendenz einer mit steigender

Spielstärke zunehmenden Dominanz des aeroben Energiestoffwechsels wider. Somit kann die im erweiterten Modell ermittelte mittlere anteilige Energiebereitstellung über alle Probanden als eine Grundorientierung zur Energiebereitstellung im Squash interpretiert werden, für welche in Abhängigkeit der Spielzeit und physischen bzw. insbesondere der kardialen Ausbelastung Entwicklungstendenzen angegeben werden können. Denn neben einer systematischen Zunahme des aeroben Energieanteils mit der Gesamtspielzeit kann aus den Ergebnissen dieser Arbeit abgeleitet werden, dass die kardiale Ausbelastung ein sensiblerer Parameter für die Beteiligung der unterschiedlichen Energiestoffwechselwege zu sein scheint. So konnte eine starke positive Korrelation der kardialen Ausbelastung mit der Beteiligung der anaeroben Energiestoffwechsel und insbesondere der anaerob laktaziden Stoffwechselkomponente sowie eine entsprechend negative Korrelation dieser mit dem aeroben Energieanteil festgestellt werden. Dies betont erneut die hohe Bedeutung einer möglichst guten Herzkreislaufökonomie.

22.5 Veränderungen im Spielverlauf

Ein Vergleich der zeitlichen Belastungsstruktur der einzelnen Sätze zeigte eine deutliche Zunahme der Dauer der Ballwechsel um $\sim 15\%$ im letzten Satz im Vergleich zu den ersten beiden Sätzen. Auf regionalem Spielniveau scheint dies abgeleitet aus einer Abnahme des prozentualen Anteils vorne gespielter Bälle sowie einer Reduktion der Schlagfrequenz potentiell durch eine defensivere, abwartendere taktische Ausrichtung begründet. Während die Anzahl der gespielten Ballwechsel im ersten und im letzten Satz annähernd gleich waren, wurden in den mittleren Sätzen 3 bis 4 Ballwechsel weniger gespielt, woraus unter Berücksichtigung der mittleren Ballwechseldauer der einzelnen Sätze eine Abnahme der Satzdauer nach dem ersten Satz mit starkem Wiederanstieg im letzten Satz resultierte. Die eindeutigste Partie in Satz 2 war nach bereits 11 Ballwechseln mit 11 : 0 Punkten beendet. Auch sonst wurden innerhalb der mittleren Sätze häufig kurze Sätze über relativ wenig Ballwechsel mit klarem Ausgang beobachtet. Bei Spielen über mehr als drei Sätze war dieses Phänomen am deutlichsten im zweiten Satz zu erkennen.

Hinsichtlich des Nutzungsverhaltens der T-Zone konnten sowohl für die Anzahl der T-Zonen-Erreichungen, die Anzahl der Wartezeitpunkte als auch für die kumulierte Standzeit in situativer T-Position hoch signifikante Veränderungen im Spielverlauf festgestellt werden. Die gefundenen Effekte sind jedoch auf eine fehlende Normalisierung hinsichtlich der Satzdauer zurückzuführen. Dies wird dadurch deutlich, dass sich die Standdauer prozentual zur Spielzeit im Spielverlauf nicht wesentlich ändert. Da die Standdauer absolut sowie prozentual zur Satzdauer betrachtet keine systematischen Veränderungen im Vergleich der Sätze zeigte, kann davon ausgegangen

werden, dass das Nutzungsverhalten der T-Zone unabhängig vom Spielniveau sowie Sieg und Niederlage im Spielverlauf konstant bleibt. Gleiches kann für das Schlagprofil sowie die meisten Aspekte des Bewegungsprofils konstatiert werden. Auch hier sind die gefundenen Effekte hinsichtlich einer sich systematisch im Spielverlauf verändernden Anzahl an Schlägen, Laufaktionen und Aktionen maximaler Intensität einer an diesem Punkt fehlenden Relativierung durch die Satzdauer zuzuschreiben. Lediglich für die Frequenz maximal intensiver Aktionen sowie die Schlagfrequenz scheint eine systematische Erhöhung im Vergleich von Satz 1 und den mittleren Sätzen real beschreibbar. Vor dem Hintergrund in Relation wenig umkämpfter mittlerer Sätze relativ kurzer Dauer scheint die hohe Frequenz maximal intensiver Aktionen sowie die hohe Schlagfrequenz in Kombination trotz fehlender Signifikanz geringer prozentualer Standzeit in T-Position insbesondere auf regionalem Spielniveau ein potentiell Zeichen von mangelnder Konzentration und Strukturverlust zu sein. Ursächlich hierfür könnte eine hohe Ermüdung in Folge hart umkämpfter erster Sätze sein. Jedoch zeigen die Ergebnisse zur Beanspruchung der einzelnen Sätze unabhängig vom Spielniveau und Sieg und Niederlage eine prinzipielle, zum Teil systematische Zunahme im Spielverlauf. So sind die kardiale und metabolische Beanspruchung gemessen an der Sauerstoffaufnahme und Herzfrequenz im ersten Satz am geringsten. Die metabolische Leistung war im Vergleich der einzelnen Sätze annähernd konstant. Hypothese H 4.1 sowie H 4.4 sind folglich auf Basis der Ergebnisse abzulehnen. Allerdings weisen der deutliche Abfall des RER nach dem ersten Satz Squash regional, Laktatwerte am Satzende von $\sim 5 \text{ mmol l}^{-1}$ und ein anaerob laktazider Anteil von $\sim 4 \%$ auf eine vor allem auch im Vergleich der mittleren Sätze hohe Beteiligung des anaerob laktaziden Energiestoffwechsels im ersten Satz hin. Dies ist physiologisch zumindest teilweise auf eine verzögerte Anpassung des Herzkreislaufsystems auf den durch die plötzlich ansteigende Belastung bedingten gesteigerten Energiebedarf zu Beginn des ersten Satzes und auf eine im Verlauf einer Belastung zunächst zunehmende Ökonomisierung dessen bei gleichzeitiger blutlaktatkonzentrationinduzierten Hemmung der Glykolyse zurückzuführen (de Marées, 2003). Auf den ersten Blick lässt sich diese Vermutung durch eine bei Zunahme von Atemfrequenz, Ventilation und Herzfrequenz und Abnahme der Beteiligung des anaerob laktaziden Energiestoffwechsels gesteigerte Sauerstoffaufnahme in den Folgesätzen verifizieren. Jedoch scheint die Zunahme von Atemfrequenz, Ventilation und Herzfrequenz in Relation zur Sauerstoffaufnahme wie schon bei Girard et al. (2007) auch hier relativ hoch, so dass ein im Spielverlauf ermüdungsbedingt unökonomischer arbeitendes Herzkreislaufsystem vermutet werden kann. Der von Girard et al. (2007) vermutete Hypovolämieeffekt auf Grund von zunehmender Dehydration scheint vor dem Hintergrund der durchschnittlichen Gesamtspielzeit von $\sim 24 \text{ min}$ und einer beginnenden Hypovolämie ab einem Flüssigkeitsverlust von ca. 2% des Körpergewichts bzw. ca. $1,5 \text{ l}$ gering. Brown & Winter (1998) berichten für Spieler

der englischen Elite einen Flüssigkeitsverlust im Spiel von $2,4 \text{ l h}^{-1}$. Auch Fritz (2009) kommt zu dem Ergebnis, dass eine Flüssigkeitszufuhr im Squash erst ab einer Spielzeit von über 30 min leistungsphysiologisch bedeutsam ist. Hypothese H 4.2 scheint folglich auf Basis der Ergebnisse bestätigt.

Im Vergleich der durchschnittlichen Pausendauer zwischen den Ballwechseln konnte bei zunehmender Beanspruchung eine sukzessive Zunahme im Spielverlauf beobachtet werden. Dies könnte ein Hinweis darauf sein, dass die Dauer der Pausen zwischen den Ballwechseln direkten Einfluss auf die Beanspruchung hat und dass eine aktive Einflussnahme auf die Dauer der Ballwechsel im Rahmen des Erlaubten als Mittel der Beanspruchungsregulation interpretiert werden kann.

Die hinsichtlich der innerhalb der einzelnen Sätze bereitgestellten Energiebeträge gefundenen Effekte scheinen erneut durch eine fehlende Relativierung durch die Satzdauer begründet. Darüber hinaus erscheint eine Interpretation der Unterschiede der innerhalb der einzelnen Sätze anaerob alaktazid bereitgestellten Energiemenge auf Grund der nach Ende von Satz 1 und Satz 2 lediglich fraktionalen, von der Dauer der Erholungsphase in der jeweiligen Satzpause abhängigen Kreatinphosphatresynthese nicht sinnvoll. Während die energetische Beteiligung des aeroben Energiestoffwechsels während des gesamten Spiels im Vergleich der einzelnen Sätze nahezu konstant bleibt, ist hinsichtlich des anaerob laktaziden Stoffwechsels eine deutliche Reduktion der Beteiligung im Spielverlauf feststellbar. Dies ist in Übereinkunft mit den Ergebnissen verschiedener Studien zur Energiebereitstellung bei maximal- bzw. hoch intensiver intermittierender Belastung, die eine enzymatische Hemmung der anaeroben Glykolyse mit zunehmendem Belastungsumfang beschreiben (s. Kapitel 6.2.5). Hypothese H 4.3 ist somit insgesamt trotz systematisch geringerer Beteiligung des anaerob laktaziden Stoffwechsels nach dem ersten Satz anhand der Ergebnisse nicht eindeutig beurteilbar.

Auf Grund einer nach obigen Darstellungen initial hohen Beteiligung des anaerob laktaziden Energiestoffwechsels und der engen Ergebnisse im ersten Satz kann vermutet werden, dass zu Beginn eines Spiels beide Spieler maximal um den Gewinn des ersten Satzes kämpfen. Vergleicht man die zeitliche Belastung, die Ergebnisse sowie Schlagfrequenz und T-Zonen-Nutzung in den mittleren Sätzen mit denen des ersten und letzten Satzes, so scheinen die mittleren Sätze vergleichsweise hergeschenkt zu werden, was möglicherweise auf eine körperliche Überanstrengung im ersten Satz und eine mentale Schwäche in den Folgesätzen zurückzuführen ist. Diese Vermutung wird auch trotz fehlender statistischer Signifikanz durch eine deutlich erhöhte Anzahl an Unforced Error gestärkt. Das Gewinnen des ersten Satzes kann folglich als ein taktischer Vorteil im Spielverlauf interpretiert werden. Unter diesem Gesichtspunkt erscheint es erstrebenswert, die Physis vor allem hinsichtlich einer

hohen Belastung im ersten Satz, aber auch über den ersten Satz hinaus und die mentale Stärke der Spieler zu trainieren. Unter der Prämisse einer blutaktatbedingt hohen Ermüdung im zweiten Satz scheinen hier aus physiologischer Perspektive erneut insbesondere Trainingsmethoden zur Verbesserung der aeroben Leistungsfähigkeit, der Herzkreislaufökonomie sowie der Laktatutilisation der oxidativen Muskelfasern erfolgversprechend.

22.6 Körperliche Leistungsfähigkeit

22.6.1 Aerobe Leistungsfähigkeit

Die Ergebnisse dieser Studie zur aeroben Leistungsfähigkeit zeigen, dass die maximale Sauerstoffaufnahme im Squash auch aktuell unabhängig vom Spielniveau einer der zentralen Aspekte der körperlichen Leistungsfähigkeit ist. So ist die maximale Sauerstoffaufnahme der Probanden mit $55,59 \text{ ml kg}^{-1} \text{ min}^{-1}$ insgesamt verglichen mit dem Bevölkerungsquerschnitt unter Berücksichtigung des Durchschnittsalters als herausragend einzustufen (ASCM, 2009). Hypothese H 5.1 kann folglich auf Basis der Ergebnisse bestätigt werden. Bei Vergleich der maximalen Sauerstoffaufnahme mit der von Spezialisten in Ausdauersportarten ist diese jedoch eher als durchschnittlich zu bewerten, scheint generell aber mit der von Athleten in anderen Sportsportarten vergleichbar (Löllgen et al., 2010). Dies erscheint vor dem Hintergrund der spezifischen Wettkampfanforderungen der Sportarten plausibel.

Trotz einer negativen Korrelation von Alter und $\text{rel } \dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$ wiesen die älteren Probanden unter Berücksichtigung ihres Alters im Vergleich zum Bevölkerungsdurchschnitt eine höhere maximale Sauerstoffaufnahme als die jüngeren Probanden auf. Die hier festgestellte Abnahme der $\text{rel } \dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$ mit dem Alter liegt leicht unter der ab einem Alter von 35 Jahren normalerweise pro Jahr zu erwartenden Reduktion. Dies ist zum Teil darauf zurückzuführen, dass bei Ausdauertrainierten die altersbedingte Abnahme der maximalen Sauerstoffaufnahme geringer ist als bei Untrainierten (Löllgen et al., 2010). Die Veränderung der maximalen Sauerstoffaufnahme in Abhängigkeit des Alters bei Ausdauertrainierten und Untrainierten ist in Abbildung 22.6.1 dargestellt und veranschaulicht die vorherige Aussage.

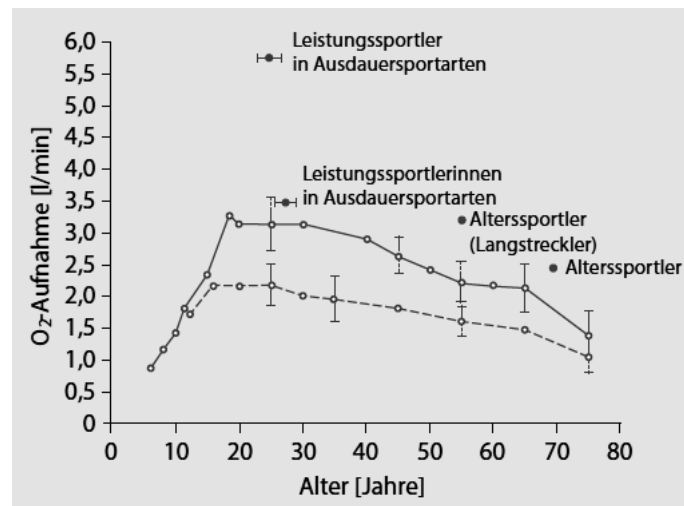


Abbildung 22.6.1: Veränderungen der maximalen Sauerstoffaufnahme in Abhängigkeit von Alter und Geschlecht (Löllgen et al., 2010, S. 236).

Im Vergleich mit den bisher veröffentlichten Daten zur maximalen Sauerstoffaufnahme im Squash sind die Ergebnisse dieser Studie bei Betrachtung aller Probanden als durchschnittlich einzustufen. Jedoch konnten starke systematische Unterschiede in Abhängigkeit des Spielniveaus festgestellt werden. So wiesen die Probanden Squash national mit $60,01 \text{ ml kg}^{-1} \text{ min}^{-1}$ eine um $\sim 19 \%$ höhere maximale Sauerstoffaufnahme auf als die Probanden Squash regional. Auch die Leistung im MSR war bei den Probanden Squash national systematisch massiv besser. Die maximale Sauerstoffaufnahme ist folglich spielniveautrennend und auf nationalem Spielniveau erheblich höher als auf regionalem Spielniveau.

Die durchschnittliche maximale Sauerstoffaufnahme der Spieler Squash national ist im sportartinternen Vergleich als sehr gut zu bewerten und scheint auf den ersten Blick annähernd mit der bei Girard et al. (2007) veröffentlichten maximalen Sauerstoffaufnahme vergleichbar. Trotz der Bestätigung der generell hohen Bedeutung der maximalen Sauerstoffaufnahme für die Sportart Squash, lassen die vorliegenden Ergebnisse somit im Vergleich mit dem von Girard et al. (2007) berichteten Wert zunächst keinen weiteren Bedeutungszuwachs dieser in den letzten 10 Jahren erkennen. Bei Betrachtung der Ergebnisse von Girard et al. (2005) als Grundlage der Ergebnisse von Girard et al. (2007) scheint jedoch ein Vergleich der maximalen Sauerstoffaufnahme der Probanden dieser Studie mit den von Girard et al. (2005) im Laufbandstufentest erhobenen Daten ($54,9 \text{ ml kg}^{-1} \text{ min}^{-1}$) und nicht mit der im Feldtest bestimmten maximalen Sauerstoffaufnahme ($63,6 \text{ ml kg}^{-1} \text{ min}^{-1}$) legitim. Während nun die maximale Sauerstoffaufnahme aller Probanden der von Girard et al. (2005) berichteten Sauerstoffaufnahme entspricht, übersteigt die der Probanden Squash national diese um $\sim 9 \%$, so dass ein Bedeutungszuwachs der aeroben Leistungsfähigkeit in dem vergangenen Jahrzehnt nicht ausgeschlossen werden kann. Bei Betrachtung der innerhalb der Laufbandspiroergometrie sowie dem Shuttle-Run-

Test ermittelten maximalen Sauerstoffaufnahme der international agierenden Spieler wird darüber hinaus deutlich, dass auf internationalem Spielniveau eine maximale Sauerstoffaufnahme von $63 \text{ ml kg}^{-1} \text{ min}^{-1}$ und mehr notwendig zu sein scheint. Unter Berücksichtigung einer methodikbedingt potentiellen Unterbewertung der $\text{rel } \dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$ um $\sim 9 \%$ (Girard et al., 2005) kann vermutet werden, dass auf internationalem Spielniveau aktuell sogar eine Sauerstoffaufnahme über $70 \text{ ml kg}^{-1} \text{ min}^{-1}$ erforderlich ist.

Da die maximale Sauerstoffaufnahme wie bereits erwähnt zu einem Großteil genetisch bedingt und folglich nur eingeschränkt trainierbar ist, scheint jedoch vor allem die Leistung an den Laktatschwellen und insbesondere an der anaeroben Schwelle eine wichtige Größe der aeroben Leistungsfähigkeit zu sein. Diesbezüglich konnte die Sauerstoffaufnahme mit $\sim 61 \%$ bzw. $\sim 83 \%$ der $\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$ sowohl hinsichtlich der aeroben als auch der anaeroben Schwelle als exzellent bewertet werden (Kindermann, 2004). In den bisherigen Studien zum Squash wird größtenteils eine anaerobe Schwelle von $\geq 80 \%$ der $\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$ berichtet. Girard et al. (2005) konnten eine Sauerstoffaufnahme an der ventilatorischen Schwelle von 83% feststellen. Somit scheinen die Ergebnisse auch bezüglich der Schwellenleistungen gut mit denen vorheriger Untersuchungen vergleichbar. Die im Vorfeld vermutete enorme Bedeutung einer möglichst guten anaeroben Schwellenleistung wird durch eine nachgewiesene starke Spielniveautrennung gestärkt. So lag die Sauerstoffaufnahme an der anaeroben Schwelle mit $50,56 \text{ ml kg}^{-1} \text{ min}^{-1}$ Squash national $\sim 23 \%$ über der Squash regional. Auch Hypothese H 5.2 kann folglich auf Basis der Ergebnisse bestätigt werden. Darüber hinaus konnte auch für die $\text{rel } \dot{V}\text{O}_{2\text{BLC4}}$ eine positive Korrelation mit der Spielstärke festgestellt werden, die im Vergleich zur maximalen Sauerstoffaufnahme sogar als etwas stärker einzustufen ist. Vor dem Hintergrund der nachgewiesenen positiven Korrelation der aeroben Leistungsfähigkeit mit der metabolischen Leistung im Spiel erscheint somit eine Interpretation der aeroben Leistungsfähigkeit als ein spielniveau- bzw. sogar innerhalb eines Spielniveaus spielstärkenlimitierender Faktor legitim. Da auch für die anaerobe Schwellenleistung eine Abnahme mit steigendem Alter nachgewiesen werden konnte, kann insgesamt eine altersbedingte Limitierung der aeroben Leistungsfähigkeit abgeleitet und somit indirekt auch eine altersbedingte Limitierung der Spielstärke vermutet werden.

Die gefundenen Unterschiede hinsichtlich der aeroben Leistungsfähigkeiten Squash national und Squash regional scheinen über den Einfluss des Alters und der Wettkampfbelastung hinaus durch ein im Vergleich erhöhtes Trainingspensum der Nationalspieler bedingt. So konnte eine systematische positive Korrelation der aeroben Leistungsfähigkeit mit dem Trainingspensum festgestellt werden.

22.6.2 Motorische Fähigkeiten

Die Ergebnisse der sportmotorischen Tests zeigen auf Basis der verwendeten Normwerttabellen (s. Anhang A.3), dass Squashspieler spielniveauunabhängig über eine ausgezeichnete aerobe Leistungsfähigkeit hinaus über eine ausgezeichnete Reaktionsgeschwindigkeit sowie eine überdurchschnittliche Beweglichkeit (Rumpfbeweglichkeit und Dehnfähigkeiten der hinteren Beinmuskulatur) und Koordination (Gleichgewichtsfähigkeit) verfügen, während die Schnellkraft der unteren Extremitäten (bilaterale vertikale und horizontale Sprungkraft) als durchschnittlich einzustufen ist. Eine eindeutige Beurteilung des Fähigkeitsniveaus bzgl. der Schnellkraft der oberen Extremitäten (bilaterale Stoßkraft) sowie der Schnelligkeit (Grundschnelligkeit) war nicht möglich. Jedoch weist die Bewertung der Ergebnisse im 30 m-Sprinttest ohne Berücksichtigung des Alters unter Miteinbezug der negativen Korrelation mit den Ergebnissen des Jump-and-Reach-Tests ebenfalls auf eine maximal durchschnittliche Sprintleistung hin. Auch bei zusätzlicher Berücksichtigung des innerhalb dieser Arbeit identifizierten Einflusses des Alters auf die Sprintleistung kann die mittlere Leistung im Sprinttest bei Rückrechnung auf die hypothetische Leistung im Alter von 20 Jahren lediglich als leicht überdurchschnittlich eingestuft werden ($4,24 \text{ s} \rightarrow 2,52$). Die durchschnittliche Stoßweite im Medizinballstoßen weist hingegen sowohl bei Vergleich mit den Normwerten für das Stoßen eines 1 kg Balles ($> 610 \text{ cm}$: durchschnittlich) sowie bei Vergleich mit den von Obra (2008) berichteten Durchschnittswerten für College-Basketballspieler im Alter von 16 – 25 Jahren ($< 4 \text{ m}$) auf eine überdurchschnittliche, wenn nicht sogar ausgezeichnete (bilaterale) Schnellkraft der oberen Extremitäten hin. Die Leistung im squashspezifischen Change-of-Direction-Speed-Test liegt bei Betrachtung der Gesamtstichprobe 7 % oberhalb der von Wilkinson et al. (2009) für englische Countyspieler und ~ 33 % über den von Wilkinson et al. (2012) für englische, auf internationalem Niveau agierende Profispieler veröffentlichten Werten. Bei isolierter Betrachtung der Spieler Squash national absolvierten diese den Agilitätstest im Durchschnitt über 2 s langsamer als die englischen Nationalspieler. Gemessen an diesen Ergebnissen kann folglich vermutet werden, dass die squashspezifische Agilität bei den deutschen Spielern im Vergleich zu englischen Elite-Squashspielern deutlich geringer ausgebildet ist. Lediglich die Leistung des besten deutschen Spielers schien annähernd mit der der englischen Spieler vergleichbar. Insgesamt ist Hypothese H 6.1 auf Basis der Ergebnisse auf Grund eines deutlich geringer als erwartet ausfallenden Schnellkraftniveaus der unteren Extremitäten sowie einer geringen Grundschnelligkeit abzulehnen.

Das Fitnessprofil stimmt dennoch größtenteils mit den Resultaten von Krasilshchikov (2014) überein, der für malaysische Jugendnationalspieler unmittelbar vergleichbare Ergebnisse im Sit-and-Reach-Test, 30 m-Sprint und Standweitsprung berichtet. Auch die Ergebnisse von Krasilshchikov (2014) beim 1 kg Medizinballstoßen wei-

sen mit durchschnittlich 13,48 m im Vergleich zu den Normwerten von Beck & Bös (1995) auf eine ausgezeichnete (bilaterale) Schnellkraft der oberen Extremitäten hin. Allerdings stellte Krasilshchikov (2014) lediglich ein gutes Ergebnis im 20 m-Shuttle-Run-Test fest. Der daraus ableitbare geringere Ausprägungsgrad der aeroben Leistungsfähigkeit scheint dabei primär durch das geringere Durchschnittsalter der Probandengruppe von Krasilshchikov (2014) mit einer Altersspanne von 10 bis 18 Jahren erklärbar. Brown et al. (1998) konnten in diesem Zusammenhang zeigen, dass Junioren im Squash im Vergleich zu Senioren eine um 7 bis 9 % geringere maximale Sauerstoffaufnahme aufweisen und führten dies auf einen entsprechenden Entwicklungsstand der Jugendspieler zurück. Auch bei de Marées (2003) lässt sich auf Grund der Beschreibung und zeitlichen Einordnung der Entwicklungsphasen der verschiedenen Komponenten der körperlichen Leistungsfähigkeit ein altersbedingt geringerer Ausprägungsgrad der aeroben Leistungsfähigkeit der Probanden bei Krasilshchikov (2014) vermuten.

Auch Chin et al. (1995) berichten für malaysische Topspieler im Alter von ~ 20 Jahren eine unmittelbar vergleichbare Beweglichkeit und aerobe Leistungsfähigkeit und weisen darüber hinaus auf eine hohe Bedeutung sowohl der anaerob alaktaziden als auch anaerob laktaziden Leistungsfähigkeit hin. Obwohl die Leistungsfähigkeit der anaeroben Energiestoffwechsel innerhalb dieser Arbeit nicht direkt erfasst wurde, lassen die als maximal durchschnittlich einzustufenden Ergebnisse innerhalb der Sprungtests sowie des 30m-Sprinttests eine lediglich durchschnittliche anaerob alaktazide Leistungsfähigkeit der Probanden vermuten. Vor dem Hintergrund der Ergebnisse des Aktivitätsprofils sowie des energetischen Profils scheint jedoch eine gute anaerob alaktazide Leistungsfähigkeit bei insbesondere möglichst hoher Kapazität erstrebenswert, wohingegen dieselben Ergebnisse auf eine untergeordnete Bedeutung einer gut ausgebildeten anaerob laktaziden Leistungsfähigkeit deuten. Die von Chin et al. (1995) berichtete gut ausgebildete anaerob laktazide Leistungsfähigkeit könnte Folge einer zum entsprechenden Untersuchungszeitpunkt weitverbreiteten Trainingsroutine bestehend aus Sprints zwischen 100 m und 400 m zurückzuführen sein (Expertenmeinung Bundestrainerteam DSQV).

Obwohl die Spieler Squash national in allen sportmotorischen Tests bessere Ergebnisse erzielten als die Spieler Squash regional, stellen lediglich die mittels dieser Tests erhobene Koordinationsfähigkeit, die squashspezifische Agilität, die Grund-schnelligkeit, die bilaterale vertikale Sprungkraft und die aerobe Leistungsfähigkeit trennende Größen dar, wodurch Hypothese H 6.2 bestätigt wird. Allerdings konnte neben den genannten motorischen Fähigkeiten eine Zunahme des Ausprägungsgrades der Reaktionsschnelligkeit sowie der bilateralen horizontalen Sprungkraft mit steigender Spielstärke festgestellt werden. Die zuvor fehlende Trennung zwischen den getesteten Spielniveaus im Standweitsprung scheint zum Teil auf Grund der

offensichtlichen Abhängigkeit der Sprungweite von der Körpergröße durch eine leicht höhere Körpergröße der Probanden Squash national begründet zu sein. Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass mit Ausnahme der bilateralen Schnellkraft der oberen Extremitäten sowie der (Rumpf-)Beweglichkeit alle motorischen Fähigkeiten und insbesondere die Reaktionsschnelligkeit und aerobe Leistungsfähigkeit mit steigendem Spielniveau an Bedeutung gewinnen. Dies könnte vor allem durch die bereits aufgezeigte Zunahme des Spieltempos bei zunehmender Spieldauer mit steigender Spielstärke begründet sein. Darüber hinaus weisen die Ergebnisse auf eine potentiell hohe Bedeutung einer möglichst guten squashspezifischen Agilität hin, die als Grundlage einer hohen Bewegungsökonomie interpretiert werden kann. Hierzu konnten Wilkinson et al. (2012) zeigen, dass die Leistung im Change-of-Direction-Speed-Test wie auch das Ergebnis im 20 m-Shuttle-Run-Test Indikatoren für die Mehrfachsprinthigkeit im Squash sind, welche vor dem Hintergrund der Belastungsstruktur ebenfalls als potentiell leistungslimitierend erscheint. Die gefundenen Korrelationen zwischen den Testergebnissen weisen diesbezüglich darauf hin, dass sich Koordinations- und Schnellkrafttraining bzw. konkret ein Training der Gleichgewichtsfähigkeit und (insbesondere vertikales) Sprungkrafttraining möglicherweise positiv auf die squashspezifische Agilität auswirken können, ohne die aerobe Leistungsfähigkeit signifikant zu reduzieren. Mit Blick auf die erzielten Ergebnisse innerhalb der Sprungtests kann folglich ein enormes Entwicklungspotential im Schnellkraftbereich konstatiert werden. Auch scheint eine bessere Reaktionsschnelligkeit eine bessere squashspezifische Agilität zu bedingen.

Eine fehlende Trennung der Spielniveaus hinsichtlich der gemessenen Beweglichkeit, der Reaktionsschnelligkeit sowie der (bilateralen) Schnellkraft der oberen Extremitäten lässt unter Berücksichtigung des jeweiligen Ausprägungsgrades im Vergleich zur Norm vermuten, dass eine hohe Reaktionsschnelligkeit unabhängig vom Spielniveau beispielsweise im Kontext möglichst früher Balltreffpunkte sowie einer möglichst hohen Aktions- und Handlungsschnelligkeit im Squash eine Art Basisfähigkeit darstellt und auch die Schnellkraft der oberen Extremitäten unter der Prämisse einer korrekten Leistungsbeurteilung im Kontext einer ausreichenden Schlaghärte als Basisfähigkeit interpretiert werden könnte. Darüber hinaus scheinen schnelle Drehungen und schnell auszuführende Schläge aus unterschiedlichen ausbalancierten Schlagpositionen sowie tiefe Ausfallschritte und Sprünge einen perfekt harmonisierenden passiven und aktiven Bewegungsapparat zu erfordern, was bei mit der Spielstärke sukzessiv steigender Aktionsrate die zunehmende Bedeutung einer möglichst gut ausgebildeten Koordination bei ausreichend guter Beweglichkeit betont. Diese Vermutung wirkt insbesondere durch die starke Korrelation der gemessenen Gleichgewichtsfähigkeit mit der Laufaktionsrate gestärkt. Unter Berücksichtigung der bisherigen Datenlage zur Bedeutung der Beweglichkeit im Badminton kann auf

Grund der engen Verwandtschaft der beiden Sportarten darüber spekuliert werden, dass auch im Squash eine exzellente Beweglichkeit insbesondere der Bein- und Schultermuskulatur im Kontext einer möglichst großen Reichweite, einer höheren Bewegungseffizienz, einer gesteigerten Maximalkraft sowie der Prophylaxe von Verletzungen von Vorteil ist (Lieshout, 2002; Phomsoupha & Laffaye, 2015). Obwohl die Bedeutung der gemessenen Schnelligkeitsfähigkeit auf Basis der Ergebnisse dieser Arbeit als eher untergeordnet zu bewerten ist, scheint die Zunahme der Grund-schnelligkeit sowie der Schnellkraft der unteren Extremitäten vor dem Hintergrund einer mit der Spielstärke steigenden Anzahl maximal intensiver Aktionen wie Antritte und maximaler Ausfallschritte und eines somit schnellkräftigeren Spiels plausibel. Lockie et al. (2011) konnten diesbezüglich für Spisportler einen Zusammenhang zwischen der Antrittsschnelligkeit und der Reaktivkraft feststellen. Auch wenn das Fähigkeitsniveau der Reaktivkraft innerhalb dieser Arbeit nicht erhoben wurde und die Antrittsschnelligkeit nicht erfasst werden konnte, weisen die Ergebnisse von Wilkinson et al. (2012) zusätzlich auf eine hohe Bedeutung einer gut ausgebildeten Reaktivkraft und folglich auch einer guten Antrittsschnelligkeit auf internationalem Spielniveau hin.

Abschließend bleibt erwähnenswert, dass, obwohl im Vorfeld vermutet wurde, dass eine angemessene Schlaghärte bei herausragender Schlagpräzision aus technischer Perspektive mit steigender Spielstärke immer bedeutsamer wird, die mit der Schlaghärte assoziierte Schnellkraft der oberen Extremitäten weder spielniveau-trennend noch mit der Spielstärke korreliert war. Diesbezüglich konnte eine starke negative Korrelation der Weite im Medizinballstoßen mit der Beteiligung des aeroben Energiestoffwechsels nachgewiesen werden, so dass vermutet werden kann, dass eine Erhöhung der Schnellkraft der oberen Extremitäten über Bedarf sich möglicherweise durch vermehrte Ausbildung von FT-Fasern nachteilig auf die Energiebereitstellung auswirken könnte. Jedoch zeigt die separate Betrachtung des international seit Jahren unter den Top-Ten agierenden Spielers, dass dieser den Medizinball im Vergleich zu den anderen Spielern mit durchschnittlich 11 % mehr deutlich weiter stieß. Dies kann als möglicher Hinweis auf eine auf internationalem Niveau erforderliche höhere Schlaghärte interpretiert werden. Zur Verifizierung dieser Vermutung wäre eine erneute Untersuchung der Fitness und insbesondere der Schnellkraft der oberen Extremitäten im Squash mit einer ausreichend hohen Anzahl international spielender Probanden erforderlich. Die Ergebnisse der Probanden Squash national wurden abschließend zur Generierung von Normwerten für Squash auf nationalem Spielniveau in Anlehnung an Oberger (2014) auf Z-Werten basierend normiert. Die Normwerte in Tabelle 22.1 können zukünftig dazu dienen, den Leistungsstand von Spielern insbesondere auf nationalem Spielniveau hinsichtlich der innerhalb dieser Arbeit getesteten Aspekte der körperlichen Leistungsfähigkeit besser beurteilen zu können und von Seiten des DSQV generelle Richtwerte und Zielgrößen auszugeben.

Tabelle 22.1: Aus den Ergebnissen der Studie abgeleitete Normwerte für die einzelnen sportmotorischen Tests Squash.

Test	4	3	2	1	0
SR [cm]	> 48,21	48,21-41,22	41,21-34,22	34,21-27,22	< 27,22
FT [cm]	< 5,2	5,2-7,3	7,4-9,0	9,1-14,0	> 14
EBSII [s]	> 34,68	34,68-29,81	29,80-24,93	24,92-20,06	< 20,06
CDS [s]	< 9,68	9,68-10,52	10,53-11,37	11,38-12,22	> 12,22
CDS ^a [s]	< 8,15	8,15-8,58	8,59-9,02	9,03-9,46	> 9,46
Sprint [s]	< 4,03	4,03-4,24	4,25-4,46	4,47-4,68	> 4,68
JR [cm]	> 62,91	62,91-54,79	54,78-46,66	46,65-38,53	< 38,53
STJ [cm]	> 256,53	256,53-235,46	235,45-214,38	214,37-193,30	< 193,30
MS [cm]	> 666,72	666,72-608,45	608,44-550,17	550,16-491,89	< 491,89
MSR [Bahnen]	> 157	157-138	137-98	97- 78	< 78
$\dot{V}O_{2max}$ [ml kg ⁻¹ min ⁻¹]	> 68,3	68,3-62,8	62,7-57,2	57,1-51,6	< 51,6

^a: Normwerte basieren auf den von Wilkinson et al. (2012) für englische Profispieler veröffentlichten Daten.

4=ausgezeichnet, 3=überdurchschnittlich, 2=durchschnittlich, 1=unterdurchschnittlich, 0=schlecht.

Einbeinstand II (EBSII), 30 m-Sprint-Test (Sprint), Change-of-Direction-Speed-Test (CDS), Jump-and-Reach-Test (JR), Standweitsprung (STJ), 20 m-Shuttle-Run (MSR), anhand der Ergebnisse des MSR geschätzte maximale Sauerstoffaufnahme ($\dot{V}O_{2max}$).

22.7 Unterschiede zwischen Gewinnern und Verlierern

Die Ergebnisse dieser Arbeit weisen wider vorheriger Vermutungen darauf hin, dass aus physiologischer Perspektive keine trennenden Unterschiede zwischen Gewinnern und Verlierern innerhalb spielstärkenhomogener Paarungen existieren. So konnten weder für die Belastungs- und Beanspruchungsparameter, noch für die Parameter der Energiebereitstellung und körperlichen Leistungsfähigkeit systematische Unterschiede in Abhängigkeit von Sieg und Niederlage nachgewiesen werden. Auch konnten insbesondere im Gegensatz zu der Untersuchung von Alvero Cruz et al. (2009) keine systematischen Unterschiede zwischen der durchschnittlichen Post-Belastung-Blutlaktatkonzentration von Gewinnern und Verlierern gefunden werden. Betrachtet man die Spielpaarungen bei Alvero Cruz et al. (2009), so wurden dort im Gegensatz zu der dieser Arbeit zu Grunde liegenden Untersuchung spielstärkenheterogene Paarungen gebildet. Darüber hinaus konnten bei Alvero Cruz et al. (2009) keine Unterschiede hinsichtlich Alter, Gewicht, Körpergröße oder Trainingsumfang festgestellt werden, so dass der gefundene Effekt tatsächlich als zwischen Gewinnern und Verlierern trennend interpretiert wurde. Auch andere Studien, die verschiedene Leistungsaspekte im Squash auf ihren trennenden Effekt zwischen Gewinnern und Verlierern untersucht haben, weisen darauf hin, dass im Gegensatz zu spielstärkenheterogenen Paarungen in spielstärkenhomogenen Paarungen keine trennenden Effekte festgestellt werden können. So konnten beispielsweise Vučković et al. (2009) zeigen, dass gemessen an einem klaren Partieausgang in spielstärkenheterogenen Paarungen die Nutzungsfrequenz und -dauer der T-Zone eine zwischen

Gewinnern und Verlierern trennende Größe ist, während in spielstärkenhomogenen Begegnungen keine signifikanten Unterschiede diesbezüglich nachgewiesen werden konnten. Die vergleichbare physische Reaktion auf eine generell vergleichbare Belastung beider Spieler scheint vor dem Hintergrund einer ebenfalls vergleichbaren körperlichen Leistungsfähigkeit plausibel. Unter dem Aspekt potentiell besserer technischer oder taktischer Fertigkeiten im Sinne einer besseren Schlagpräzision, situativ besseren Schlagauswahl o. Ä. wurde eine größere Spieldominanz seitens des Gewinners erwartet. Dies müsste in Konsequenz zu einer höheren Laufaktionsrate des Verlierers und einer erhöhten T-Dominanz des Gewinners führen. Beides konnte jedoch innerhalb dieser Arbeit nicht nachgewiesen werden. Diese Ergebnisse lassen vermuten, dass bei vergleichbarer Spielstärke die Voraussetzungen beider Spieler hinsichtlich wichtiger Aspekte der körperlichen Leistungsfähigkeit sowie taktischer und technischer Fertigkeiten annähernd identisch oder aber zumindest prinzipiell vergleichbar sind und dass bisher nicht erfasste, vielleicht sogar nicht erfassbare Aspekte der Spielleistung wie die mentale Stärke oder der Zufall in solchen Begegnungen über Sieg und Niederlage entscheiden. Sämtliche Hypothesen zu potentiellen Unterschieden zwischen Gewinnern und Verlierern müssen folglich auf Basis der Ergebnisse dieser Arbeit verworfen werden.

Bei Betrachtung der Beanspruchung von Gewinnern und Verlierern unter zusätzlicher Berücksichtigung des jeweiligen Spielniveaus fällt jedoch auf, dass auf nationalem Spielniveau die Gewinner eine höhere metabolische Leistung bei leicht höherer physischer Ausbelastung erbrachten, während Squash regional für die Verlierer eine höhere metabolische Leistung bei generell vergleichbarer physischer Ausbelastung festgestellt werden konnte. Da die Teststärke insgesamt auf Grund des zu geringen Stichprobenumfangs bei separater Betrachtung der Spielniveaus als sehr gering bewertet werden muss, könnte dies mit Blick auf das im Vergleich systematisch höhere Alter der Gewinner Squash regional zunächst einen Hinweis darauf darstellen, dass es auf regionalem Spielniveau auch deutlich älteren Spielern möglicherweise auf Grund ihrer enormen Spielerfahrung trotz geringerer körperlicher Leistungsfähigkeit möglich ist, bei insgesamt geringerer metabolischer Leistung ein Spiel für sich zu entscheiden, wohingegen dies auf nationalem Spielniveau nicht möglich erscheint. Dies verstärkt den Eindruck einer altersbedingten Spielstärkenlimitation. Darüber hinaus scheint vor dem Hintergrund des positiven Zusammenhanges von Alter und Spielerfahrung unter der Prämisse eines positiven Zusammenhanges von Spielerfahrung und Spieldominanz zumindest in regionalen Spielklassen der Aspekt der Spielerfahrung einen entscheidenden Einfluss auf den Ausgang einer Partie haben zu können. Es konnte jedoch kein systematischer Unterschied hinsichtlich der Spielerfahrung von Gewinnern und Verlierern insbesondere innerhalb der Stichprobe Squash regional nachgewiesen werden. Eine Bewertung der Teststärke verwies allerdings erneut auf einen zu geringen Stichprobenumfang, um das Vorhanden-

sein eines Unterschieds diesbezüglich mit ausreichender Sicherheit ausschließen zu können. Die Feststellung eines signifikant um $\sim 7\%$ höheren Körpergewichts seitens der Gewinner Squash regional verstärkt jedoch zusätzlich den Eindruck einer auf regionalem Spielniveau nicht ausschlaggebenden Bedeutung der körperlichen Leistungsfähigkeit und Körperkonstitution für den Ausgang einer Partie.

Um die beschriebenen Effekte mit einer ausreichend großen Wahrscheinlichkeit von 80% statistisch nachweisen zu können, müsste eine erneute Untersuchung von 102 Spielern Squash regional erfolgen. Darüber hinaus scheint es vor dem beschriebenen Hintergrund sinnvoll, in einer Folgeuntersuchung mögliche Korrelation des Alters respektive der Spielerfahrung mit der Spieldominanz sowie mit aktiver Beanspruchungsregulation assoziierten Aktionen zu untersuchen.

Obwohl wie bereits beschrieben hinsichtlich der körperlichen Leistungsfähigkeit prinzipiell keine bedeutsamen Unterschiede zwischen Gewinnern und Verlierern gefunden werden konnten, erzielten die Gewinner bei Reduktion auf die Probanden Squash national systematisch bessere Ergebnisse im Change-of-Direction-Speed-Test. Es kann also vermutet werden, dass die squashspezifische Agilität eine auf nationalem Spielniveau zwischen Gewinnern und Verlierern trennende Größe darstellt. Die hohe Bedeutung der squashspezifischen Agilität wurde innerhalb der Diskussion der motorischen Fähigkeiten bereits aufgezeigt und scheint durch dieses Ergebnis zusätzlich verstärkt.

Lediglich für die Anzahl geschlagener Winner konnte eine systematische Trennung zwischen Gewinnern und Verlierern festgestellt werden. So schlugen die Gewinner deutlich mehr Winner als die Verlierer. Dies erscheint mit Blick auf den Begegnungsausgang plausibel. Darüber hinaus betont dieser Unterschied die Notwendigkeit, im modernen Squash aktiv den Punkt machen zu müssen, wohingegen nach Einschätzung ehemaliger Spieler der nationalen Spitze früher häufig die Fehler des Gegners zum Spielgewinn führten (Experteninterview 2018). Dies verstärkt erneut den Eindruck eines offensiver gewordenen Spiels.

22.8 Vergleich mit anderen Sportarten

Verglichen mit den anderen großen Racketsportarten Tennis, Tischtennis und Badminton scheint Squash hinsichtlich Belastung, Beanspruchung und körperlicher Leistungsfähigkeit am ehesten mit Badminton vergleichbar zu sein. Die innerhalb dieser Arbeit gemessene durchschnittliche Sauerstoffaufnahme ($43,62 \text{ ml kg}^{-1} \text{ min}^{-1}$) sowie die kardiale und metabolische Ausbelastung (96% bzw. 79%) sind deutlich höher als im Tennis und Tischtennis und entsprechen annähernd der Datenlage im Badminton (s. Tabelle 22.2). Tabelle 22.2 enthält ausgewählte repräsentative

Forschungsergebnisse zur Beanspruchung und körperlichen Leistungsfähigkeit im Tennis, Tischtennis und Badminton.

Tabelle 22.2: Ausgewählte Forschungsergebnisse zu Beanspruchung und aerober Leistungsfähigkeit im Tennis, Tischtennis und Badminton.

Autor(en)	Sportart	$\dot{V}O_2$	% $\dot{V}O_{2max}$	HR	%HR _{max}	BLC	$\dot{V}O_{2max}$	HR _{max}
Smekal et al. 2001	Single Tennis (Clay)	29,1	-	151	-	2,07	-	-
Suchomel 2010	Tischtennis regional	-	-	141	70	-	48,6	191
Suchomel 2010	Tischtennis national	-	-	156	78	-	62,1	196
Zagatto et al. 2016	Table Tennis national	29,4	66,8 ^a	164	81,2	1,8	44,0	183
Majumdar et al. 1997	Badminton Sub-Elite	55,7	-	157	-	4,7	-	183
Faude et al. 2007	Badminton Elite	46	74,8	166	89	1,9	61,8	188 ^a
Kempton 2008	Badminton reg./nat.	46,2	74	170	86	3,64	61,1	198

^a: aus den Daten abgeleitet.

Durchschnittliche Sauerstoffaufnahme ($\dot{V}O_2$ [ml kg⁻¹ min⁻¹]), durchschnittliche Sauerstoffaufnahme in Prozent der maximalen Sauerstoffaufnahme (% $\dot{V}O_{2max}$ [%]), durchschnittliche Herzfrequenz (HR [bpm]), durchschnittliche Herzfrequenz in Prozent der maximalen Herzfrequenz (%HR [%]), durchschnittliche Post-Belastung-Blutlaktatkonzentration (BLC [mmol l⁻¹]), maximale Sauerstoffaufnahme ($\dot{V}O_{2max}$ [ml kg⁻¹ min⁻¹]), maximale Herzfrequenz (HR_{max} [bpm]).

Abbildung 22.3 enthält exemplarische Daten zur zeitlichen Belastungsstruktur von Tennis, Tischtennis und Badminton.

Tabelle 22.3: Ausgewählte Forschungsergebnisse zur zeitlichen Belastungsstruktur im Tennis, Tischtennis und Badminton.

Autor(en)	Sportart	DR [s]	RT [s]	EPT [%]	TPT [s]	SF [spm]
Morante & Brotherhood 2006	Tennis Elite AO	6,4	- 17,5	178,6	44,0	
Morante & Brotherhood 2006	Tennis Elite W	5,2	- 20,5	137	45,1	
Faude et al. 2007	Badminton Elite	5,5	11,4	31,2	-	55,64
Kempton 2008	Badminton reg./nat.	5,1	8,4	39	280 ^a	57
Zagatto et al. 2016	Tischtennis national	3,4	8,2	23,5	344,1	73,8 ^a

^a: aus den Daten abgeleitet, AO: Australian Open, WB: Wimbledon.

Durchschnittliche Ballwechseldauer (DR), durchschnittliche Dauer der Pause zwischen den Ballwechseln (RT), effektive Spielzeit (EPT), durchschnittliche Gesamtspielzeit eines Satzes (TPT), durchschnittliche Schlagfrequenz (SF).

Bei zusätzlicher Berücksichtigung der zeitlichen Belastungsstruktur der Sportarten (s. Tabelle 22.3) erscheint es vor diesem Hintergrund nicht verwunderlich, dass die bisherige Datenlage auch einen für Tennis und Tischtennis geringeren Energieumsatz als den innerhalb dieser Arbeit berechneten (15,28 W kg⁻¹, 4309,20 kJ h⁻¹) suggerieren. So berichten Ferrauti et al. (2001) für Tennis auf nationalem Spielniveau einen Arbeitsumsatz von 41,8 kJ min⁻¹, was hochgerechnet auf eine Stunde 2508 kJ h⁻¹ entspricht. Aus den Ergebnissen von Zagatto et al. (2016) lässt sich für die Sportart Tischtennis ein Arbeitsumsatz von 2335 kJ h⁻¹ ableiten. Dabei scheint der höhere Arbeitsumsatz im Squash primär durch eine höhere effektive Spielzeit und größere Belastung-Pause-Relation begründet zu sein (s. Tabelle 22.3). Auf Grund der innerhalb dieser Arbeit nachgewiesenen hohen Korrelation von metabolischer

Leistung und Aktionsrate der unteren Extremitäten kann darüber hinaus über eine höhere Frequenz an Laufaktionen im Squash im Vergleich zum Tennis und Tischtennis spekuliert werden.

Auch hinsichtlich der energetischen Anforderungen scheint Squash am ehesten mit Badminton vergleichbar zu sein. Laut Weineck (2010) liegt der stündliche Energiebedarf im Badminton nach Stegemann (1971) bei $52,92 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$ und damit leicht unterhalb dem hier für Squash berechneten gewichtsbezogenen Energieumsatz von $\sim 55 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$. Basierend auf einer von Kempster (2008) berichteten durchschnittlichen Sauerstoffaufnahme von $46,2 \text{ ml kg}^{-1} \text{ min}^{-1}$, einer durchschnittlichen Blutlaktatkonzentration von $3,64 \text{ mmol l}^{-1}$ und unter der Annahme einer ähnlichen Bedeutung des anaerob alaktaziden Energiestoffwechsels für die Energiebereitstellung im Badminton wie im Squash kann auch aktuell ein mit Squash vergleichbarer stündlicher Energiebedarf vermutet werden. Dies erscheint vor dem Hintergrund der zeitlichen Belastungs- und Aktivitätsstruktur im Badminton sowie der innerhalb dieser Arbeit nachgewiesenen positiven Korrelationen von der metabolischen Leistung mit der effektiven Spielzeit, der Belastung-Pause-Relation und der Schlagfrequenz plausibel. Denn obwohl die von Kempster (2008) berichtete effektive Spielzeit im Badminton mit 39 % und die Belastung-Pause-Relation mit 1 : 1,6 leicht unterhalb der innerhalb dieser Arbeit festgestellten Werte für Squash liegen (EPT: 55 %, ERR: 1 : 1,24), ist die Schlagfrequenz mit $> 55 \text{ spm}$ innerhalb der effektiven Spielzeit laut der Ergebnisse von Faude et al. (2007) sowie Kempster (2008) im Badminton auf internationalem Spielniveau um ein Drittel höher.

Der innerhalb dieser Arbeit für Squash berechnete Energiebedarf ist auch im Vergleich mit anderen Sportarten als sehr hoch zu bewerten (Weineck, 2010). Bei Anwendung der Formel

$$\text{Energieumsatz } [\text{kJ min}^{-1}] = -11,6 + 0,19 \cdot \text{Körpermasse } [\text{kg}] + 3,7 \cdot v [\text{km h}^{-1}]$$

(de Marées, 2003) entspricht die metabolische Leistung im Squash einer Laufleistung von $\sim 15 \text{ km h}^{-1}$.

Auch die anteilige Energiebereitstellung scheint auf Grund der Daten zur Belastung und Beanspruchung mit der im Badminton vergleichbar. So schätzen Phomsoupha & Laffaye (2015) in ihrer Review auf Basis der bisherigen Datenlagen zur Belastung und Beanspruchung im Badminton, dass die Energiebereitstellung zu 60 – 70 % aerob und zu 30 % anaerob erfolgt. Doch weisen die durchschnittlichen Post-Belastungs-Blutlaktatkonzentrationen auf eine prinzipiell leicht höhere Beteiligung des anaerob alaktaziden Energiestoffwechsels an der Energiebereitstellung im Squash hin. So berichten Majumdar et al. (1997), Kempster (2008) und Faude et al. (2007) für Badmintonspieler abhängig vom Spielniveau eine durchschnittliche Blutlaktatkonzentration

leicht unterhalb des innerhalb dieser Arbeit und weit unter dem von Girard et al. (2007) festgestellten Wert.

Die Berechnung der anteiligen Energiebereitstellung ist nach eigenem Kenntnisstand bisher für die Sportsportart Tischtennis und Basketball sowie die Kampfsportarten Karate, Taekwondo und Boxen erfolgt (Zagatto et al., 2016; Beneke et al., 2004; Campos et al., 2012; Davis et al., 2014, Latzl et al., 2017). Auf Grund der vergleichsweise hohen Verwandtschaft von Squash und Tischtennis als Racketsportarten erscheint primär ein Vergleich mit der anteiligen Energiebereitstellung im Tischtennis von Interesse zu sein. Da die Berechnungsmethodik von Zagatto et al. (2016) dem konservativen Berechnungsmodell ohne Berücksichtigung der Satzpausen als Erholungsphasen entspricht, kann ein Vergleich der anteiligen Energiebereitstellung von Squash und Tischtennis lediglich anhand der Ergebnisse des konservativen Modells erfolgen. Die höhere Beteiligung der anaeroben Energiestoffwechsel im Squash im Vergleich zu Tischtennis erscheint in Anbetracht der Berechnungsmethodik sowie einer im Tischtennis um mehr als 10 % geringeren durchschnittlichen Sauerstoffaufnahme und einer mit weniger als 2 mmol l^{-1} deutlich geringeren durchschnittlichen Blutlaktatkonzentrationen plausibel. Generell zeigen die Ergebnisse dieser Arbeit eine große Übereinstimmung zu den bisher existierenden energetischen Profilen, die allesamt die aerobe Energiebereitstellung als dominant identifizieren.

Auch die körperliche Leistungsfähigkeit Squash scheint generell gut mit der im Badminton und zum Teil mit der im Tennis vergleichbar. So konnte Kempter (2008) für Badmintonspieler der vier obersten Spielklassen in Deutschland eine maximale Sauerstoffaufnahme von durchschnittlich $61 \text{ ml kg}^{-1} \text{ min}^{-1}$ sowie anaerobe Schwellenwerte von 81 % dieser feststellen. Ooi et al. (2009) berichten für malaysische Top-Badmintonspieler vergleichbaren Alters eine $\dot{V}O_{2\text{max}}$ von $56,9 \text{ ml kg}^{-1} \text{ min}^{-1}$. Auch im Badminton konnte eine Zunahme der maximalen Sauerstoffaufnahme mit steigendem Spielniveau festgestellt werden (Kempter, 2008), so dass davon ausgegangen werden kann, dass auch im Badminton ein möglichst gute aerobe Leistungsfähigkeit mit steigendem Spielniveau immer bedeutsamer wird. Im Tennis konstatieren Torres-Luque et al. (2011) in Abhängigkeit von Spielniveau und Geschlecht eine maximale Sauerstoffaufnahme von $45 - 65 \text{ ml kg}^{-1} \text{ min}^{-1}$. Die von Zagatto et al. (2016) für Top-Tischtennisspieler berichtete maximale Sauerstoffaufnahme von $44 \text{ ml kg}^{-1} \text{ min}^{-1}$ liegt hingegen deutlich unterhalb des innerhalb dieser Arbeit festgestellten Wertes. Auch hinsichtlich der übrigen innerhalb dieser Arbeit erhobenen Komponenten der körperlichen Leistungsfähigkeiten zeigen sich deutliche Parallelen von Squash und Badminton. So wurden innerhalb einer Studie zum Badminton aus den 1980er Jahren die Koordination, die Schnelligkeit, die Kraft, die Ausdauer und die Beweglichkeit als generell wichtige Komponenten der körperlichen Leistungsfähigkeiten identifiziert

(Dick, 1986). Phomsoupha & Laffaye (2015) konstatieren in ihrer Review, dass die Schnelligkeit, Agilität, Beweglichkeit, Kraft und Ausdauer im Badminton mit steigender Spielstärke immer bedeutsamer werden. Kaplan et al. (2017) berichten daneben für Spieler der nationalen Elite eine schnelle Reaktion auf visuelle Reize. Trotz einer generellen Vergleichbarkeit ist das Fähigkeitsniveau hinsichtlich Beweglichkeit, Schnelligkeit und Schnellkraft der unteren Extremitäten im Badminton etwas höher zu bewerten als im Squash. So wurde für Badmintonspieler nationaler Elite eine gute bis ausgezeichnete Reichweite von 36 – 43 cm im Sit-and-Reach-Test berichtet (Yadav, 2017; Abdullahi et al., 2017). Die Schnelligkeitsleistung liegt laut der Ergebnisse von Abdullahi et al. (2017) mit 4,3 s über der durchschnittlichen Sprintleistung der Squasher auf 30 m. Obwohl Kaplan et al. (2017) mit durchschnittlich 41,45 m im Vertical-Jump-Test auch eine höhere bilaterale vertikale Sprungkraft berichten, ist diese auch im Badminton nicht nur im Vergleich zur Bevölkerungsnorm, sondern insbesondere auch hinsichtlich der Sprungleistungen in anderen Sportarten als unterdurchschnittlich zu bewerten. So liegt nach Albay et al. (2008) die durchschnittliche Sprunghöhe im Volleyball bei 65,72 cm, im Fußball bei 54,37 cm und im Handball bei 53,80 cm. Vor dem Hintergrund der Anforderungsprofile dieser Sportarten und unter Berücksichtigung der geringen Anzahl an Sprüngen im Squash scheint dieser Fähigkeitsunterschied plausibel. So ist beispielsweise das Aktivitätsprofil im Volleyball durch Angriffsschläge über Kopf geprägt, denen in der Regel ein vertikaler Sprung vorausgeht. Obwohl im Badminton auf Grund der Netzhöhe vermutlich deutlich mehr Schläge über Kopf ausgeführt werden, als im Squash, erscheint hier ebenfalls netzhöhenbedingt ein vorausgehender Sprung für gewöhnlich nicht notwendig.

Die Ausprägung der motorischen Fähigkeiten im Squash und Badminton erscheint vor dem Hintergrund sich in Abhängigkeit der spezifischen Anforderungen einer Sportart entwickelnden körperlichen Leistungsfähigkeit und der hinsichtlich dieser dargestellten Unterschiede und Parallelen sowie eines prinzipiell vergleichbaren Trainingspensums plausibel. So berichtet Kempster (2008) für Badminton mit einem Trainingsumfang von ca. 10 h pro Woche, wobei ca. 6 – 7 h badmintonspezifisch und 3 – 4 h allgemein trainiert werden (Kraft, Ausdauer und andere Sportspiele), ein unmittelbar mit den innerhalb dieser Arbeit erhobenen Daten vergleichbares Trainingspensum, wobei jedoch auf ein prinzipiell geringeres Leistungsniveau der Probanden von Kempster (Badmintonspieler der obersten vier Spielklassen des DBV mit nur einem Spieler aus der 1. Bundesliga) verwiesen werden muss. Unter der Prämisse eines sich auch im Badminton im Übergang vom regionalen aufs nationale Spielniveau annähernd verdoppelten Trainingspensums, kann ein leicht höherer wöchentlicher Trainingsumfang im Badminton als im Squash vermutet werden. Dabei fällt insgesamt auf, dass laut dieser Studie sowie der Studie von Kempster (2008) sowohl Squash- als auch Badmintonspieler auch auf nationalem Spielniveau kein

gesondertes Beweglichkeits-, Mobilitäts-, Schnelligkeits- oder Sprungkrafttraining vornehmen.

22.9 Wirkungsgefüge und Einflüsse auf die Energiebereitstellung

Die Ergebnisse dieser Studie haben gezeigt, dass im Squash unmittelbare Zusammenhänge zwischen Belastung, Beanspruchung, körperliche Leistungsfähigkeit und der Spielstärke existieren. So konnte beobachtet werden, dass die Belastung im Spiel gemessen an der Belastungsdauer, -dichte und dem Belastungsumfang sowie der Aktionsrate mit steigender Spielstärke zunimmt. Dabei konnte insbesondere eine starke Zunahme der Schlagfrequenz sowie der Laufaktionsrate innerhalb der aktiven Spielzeit beobachtet werden.

Auf Basis mit steigender Spielstärke zunehmender Belastung konnte eine Zunahme der metabolischen Leistung nachgewiesen werden, was primär durch eine Erhöhung der Laufaktionsrate innerhalb der aktiven Spielzeit begründet zu sein scheint. In Kapitel 22.2.2 wurde bereits erläutert, dass die Zunahme der Laufaktionsrate möglicherweise ein gemeinsames Phänomen einer offensiveren Spieltaktik und einer besseren Schlagpräzision ist und eine durchschnittlich höhere Laufgeschwindigkeit impliziert, welche zum Teil durch eine zunehmende Anzahl von Antritten bedingt sein könnte. Diese Vermutung wird durch die Zunahme der Anzahl und Rate maximal intensiver Aktionen mit steigender Spielstärke gestärkt. Trotz steigender metabolischer Leistung, konnte bei registrierbarer leichter Abnahme keine systematische Veränderung der physischen Ausbelastung mit steigender Spielstärke festgestellt werden, was angesichts der starken positiven Korrelation von Spielstärke und aerober Leistungsfähigkeit plausibel erscheint.

Vor dem Hintergrund einer spielstärkenunabhängigen hohen durchschnittlichen physischen Ausbelastung im inneren Bereich der Laufbandspiroergometrie ermittelten anaeroben Schwellenbereich scheint es für den Squashspieler im Kontext der Erhöhung seiner Spielstärke aus physiologischer Perspektive essentiell zu sein, eine immer höhere metabolische Leistung ohne mit einer potentiell dauerhaften Überschreitung des maximalen Laktat-Steady-States assoziierten Zunahme der physischen Ausbelastung erbringen zu können. Diesbezüglich weisen die Ergebnisse von Girard et al. (2007) darauf hin, dass bereits bei Zunahme der durchschnittlichen physischen Ausbelastung auf $> 85\%$ der $\dot{V}O_{2\max}$ und bei Überschreitung der anaeroben Schwelle in einem Viertel der Spielzeit das Aufrechterhalten der metabolischen Leistung über die Dauer des gesamten Spiels nicht mehr möglich ist. Dies scheint darin begründet, dass eine andauernde Überschreitung des maximalen Laktat-Steady-States durch eine im Zuge einer vermehrten Laktatbildung erhöhte Anhäufung von H^+ -Ionen zu einer pH-Wertverschiebung in Richtung einer Azidose führt, in deren Konsequenz die

Energieflussrate deutlich vermindert wird (de Marées, 2003). Da die Belastungspausen während des Spiels, aber auch zwischen den Sätzen, zu gering sind, um große Laktatmengen innerhalb der Spielzeit wieder abzubauen (s. Kapitel 6.2.3), muss ein andauerndes Überschreiten der anaeroben Schwelle vermieden werden. Hier scheint bei intermittierenden Belastungen ein körpereigener Schutzmechanismus zu existieren, in dem bei zu hoher Intensität über einen längeren Zeitraum einer exponentiellen Laktatakkumulation durch enzymatische Hemmung der anaerob-laktaziden Energiegewinnung in den nachfolgenden Belastungsphasen entgegengewirkt wird. Somit scheint die festgestellte physische Ausbelastung das physiologische Limit für den Erhalt einer möglichst hohen Energieflussrate über das gesamte Spiel darzustellen. Um trotz dieses Limits eine höhere metabolische Leistung bei zunehmender Ballwechseldauer und steigender Rate (maximal intensiver) Aktionen erbringen zu können, ist es notwendig, die aerobe Leistungsfähigkeit zu steigern. Dabei geht die Fähigkeit zum Erbringen einer höheren metabolischen Leistung laut Ergebnislage primär mit einer Erhöhung der anaeroben Schwelle einher. Dies betont erneut die Bedeutung der aeroben Leistungsfähigkeit als wesentlichen Aspekt der körperlichen Leistungsfähigkeit im Squash, welche als trennende Größe im Übergang verschiedener Spielniveaus auch innerhalb eines Spielniveaus die Spielstärke determiniert und somit als eine Art Ausgangsvoraussetzung für das potentiell erfolgreiche Spielen auf einem bestimmten Level interpretiert werden kann. Betrachtet man vor diesem Hintergrund die Veränderung der aeroben Leistungsfähigkeit mit zunehmendem Alter, so scheint es nicht verwunderlich, dass Spieler ab einem bestimmten Alter ohne besondere Fertigkeiten hinsichtlich Spieldominanz und Beanspruchungsregulation nicht mehr erfolgreich auf nationalem und internationalem Niveau agieren können. Die derzeit auf internationalem Spielniveau notwendig erscheinende maximale Sauerstoffaufnahme (s. Kapitel 22.6.2) entspricht innerhalb der Probandengruppe Squash regional durchschnittlich $\sim 163\%$ der Altersnorm.

Hinsichtlich möglicher Mechanismen der Beanspruchungsregulation weisen die Ergebnisse auf einen potentiell beanspruchungsreduzierenden Effekt einer möglichst langen Standzeit auf dem T hin. Diesbezüglich konnte eine signifikante Veränderung des Nutzungsverhaltens der T-Zone in Abhängigkeit der Spielstärke registriert werden. So wurde mit steigender Spielstärke die T-Zone nach eigenem Schlag nicht nur immer häufiger erreicht, sondern auch die Standzeit in situativer T-Position zunehmend länger. Aus zeitlicher Perspektive wird durch eine längere Standzeit auf dem T die effektive Spielzeit marginal reduziert und die Belastung-Pause-Relation hin zu einem höheren Pausenanteil verschoben. Darüber können durch eine geschickte Positionierung in der T-Zone lange Laufwege zum Ball vermieden werden.

Daneben scheint durch eine gute Reaktionsschnelligkeit die Anzahl maximal intensiver Aktionen und insbesondere die Anzahl harter Richtungswechsel generell

vermindert werden und somit auch die Beanspruchung reduziert werden zu können. Ebenfalls scheinen die Spieler die Beanspruchung durch die Länge der Pausen zwischen den Ballwechseln aktiv zu regulieren. Mit zunehmender Belastungsdauer und zunehmendem Belastungsumfang wird durch eine Steigerung der Dauer der Belastungspausen die Relation aus Belastung und Pause zu Gunsten längerer Erholungsphasen aktiv verschoben. Auch zeigte sich, dass die Pausenlänge zwischen den Ballwechseln mit der Anzahl maximal intensiver Aktionen zunahm. So scheint die Pausengestaltung insgesamt eine beanspruchungsregulierende Funktion zu haben. Dieser beanspruchungsregulierende Mechanismus ist jedoch dadurch limitiert, dass ein unverhältnismäßig langes Ausdehnen der Pausendauer vom Schiedsrichter als Zeitspiel unterbunden wird. Unter Berücksichtigung des exponentiellen Verhaltens der zur Regeneration der anaeroben Energiestoffwechsel dienenden Nachatmung erscheint jedoch bereits eine geringe Verlängerung der Pausendauer einen großen positiven Effekt auf die Regeneration zu haben. Bei Veranschlagung der durchschnittlichen Sauerstoffkinetik der schnellen Komponente der Nachatmung kann so beispielsweise durch eine Ausdehnung der durchschnittlichen Dauer der Pausen zwischen den Ballwechseln (~ 9 s) um 3 s die Sauerstoffaufnahme zur Rephosphorylierung von PCr um 30 % erhöht werden.

In Übereinkunft mit den Ergebnissen von Bogdanis et al. (1996), die bei hoch intensiven Intervallbelastungen eine Abnahme der anaeroben Energiebereitstellung mit zunehmender Wiederholungszahl feststellen konnten, konnte eine Zunahme der Dominanz des aeroben Energiestoffwechsels mit der Netto-Gesamtspielzeit festgestellt werden. Auf Grund der Belastungsstruktur von Squash kann auch hier vermutet werden, dass die Beteiligung des aeroben Energiestoffwechsels mit dem Belastungsumfang auf Grund der akkumuliert unvollständigen Resynthese von Kreatinphosphat und einer zeitweiligen Hemmung des laktaziden Energiestoffwechsels zunimmt. Dabei scheinen insbesondere eine hohe Belastung-Pause-Relation und eine hohe effektive Spielzeit den Hemmungsmechanismus bzgl. der Glykolyse zu verstärken, was vor dem Hintergrund längerer Belastungsphasen und kürzerer Erholungszeit physiologisch plausibel erscheint. Da eine Zunahme der Netto-Gesamtspielzeit, der Belastung-Pause-Relation und der effektiven Spielzeit mit der Spielstärke festgestellt werden konnte, scheint es nicht verwunderlich, dass auch die Beteiligung des aeroben Energiestoffwechsels an der Energiebereitstellung mit der Spielstärke zuzunehmen und die des anaerob laktaziden Energiestoffwechsels abnimmt. Somit kann von einem zusätzlich durch die zunehmende Spielzeit bedingten Bedeutungsgewinn der aeroben Leistungsfähigkeit mit steigendem Spielniveau ausgegangen werden.

Betrachtet man den Einfluss des prozentualen Anteils an Schritten und vorne gespielten Bällen auf die Art der Energiebereitstellung, so scheinen beide mit einer erhöhten

Energieflussrate assoziiert. Phänomenologisch sind vorne gespielte Bälle häufig mit zuvor absolvierten Antritten verbunden, die ihrerseits per Definition einer erhöhten bzw. maximalen Energieflussrate bedürfen. Diesbezüglich weisen die Ergebnisse auf einen potentiell systematischen Zusammenhang zwischen der Anzahl der Antritte und der Anzahl vorne gespielter Bälle hin. Die nachgewiesenen konträren Einflüsse des prozentualen Anteils an Sidesteps und Schritten auf die Art der Energiebereitstellung kann die im Vorfeld formulierte Vermutung einer durch Sidesteps verbundenen besseren Bewegungsökonomie bestätigen.

Betrachtet man abschließend den Zusammenhang von Alter und körperlicher Leistungsfähigkeit, so scheint das Alter durch den negativen Einfluss auf die aerobe Leistungsfähigkeit sowie die Schnelligkeit und Koordination die Leistungsfähigkeit der Spieler aus physiologischer Perspektive zu determinieren.

22.10 Trainingsempfehlungen

Die Ergebnisse dieser Arbeit bestätigen den bisherigen Forschungsstand, dass für den Squashspieler eine möglichst gut ausgebildete aerobe Leistungsfähigkeit mit möglichst hoher anaerober Schwelle von herausragender Bedeutung ist. Ein Training zur Verbesserung der aeroben Leistungsfähigkeit kann auf verschiedene Adaptionen auf morphologischer, zellulärer oder metabolischer Ebene abzielen. Während morphologische Anpassung primär durch Belastungen mit hohem Umfang und geringer bis moderater Intensität ausgelöst werden, ist zum Auslösen zellulärer und metabolischer Adaptionen ein Training mit eher geringem Umfang und hohen Intensitäten erforderlich (Weineck, 2012). Diesbezüglich wird zwischen hochvolumigem Training (HVT) und hoch intensivem Training, welches in der Regel in Form von intensiven Intervallen absolviert wird (hoch intensives Intervalltraining, HIIT), unterschieden. Die Entscheidung für die geeignete Trainingsmethode sollte unter Berücksichtigung der aktuellen aeroben Leistungsfähigkeit sowie weiterer Parameter wie beispielsweise der Herzfrequenzerholung, dem Ruhepuls oder der maximalen Leistung erfolgen. Während nach aktueller Studienlage zur kurzzeitigen, schnellen Steigerung der maximalen Sauerstoffaufnahme insbesondere bei Hochleistungssportlern HIIT einen Vorteil vor HVT zu haben scheint, sollte zum Anheben der aeroben Schwelle und zur Vermeidung von Übertrainingseffekten auch im HV-Bereich trainiert werden. Die in Kapitel 22.4 beschriebene Parallelität zwischen der Energiebereitstellung im Squash und der bei hoch intensivem Intervalltraining weist darüber hinaus darauf hin, dass jedoch insbesondere HII-Training eine sinnvolle Trainingsmethode darstellen kann, um die energetischen Anforderungen im Squash zu simulieren und die benötigte Form der Energiebereitstellung gezielt zu trainieren. Auch konnte in mehreren Studien bereits ein positiver Zusammenhang von aerober Leistungsfähigkeit und Mehrfachsprintfähigkeit nachgewiesen werden (u. a. Ong et al., 2007; Wilkinson et

al., 2012), welche laut Belastungsanalyse eine wesentliche Fähigkeit im Squash zu sein scheint. Vor diesem Hintergrund könnte auch ein HII-Training mit im Vergleich zu dem Protokoll von Panissa et al. (2018) höherer Belastungsintensität und kürzerer Dauer sowohl der Belastungs- als auch der Erholungsphasen sinnvoll sein, um die squashspezifische Ausdauerleistungsfähigkeit zu verbessern. Eine möglichst gute Herzkreislaufökonomie scheint prinzipiell mit einer schnellen Reaktion der Herzfrequenz auf die Belastungssteigerung sowie den Belastungsabbruch verbunden. Vor diesem Hintergrund könnten neben normalen HV-Training zur Auslösung vorwiegend morphologischer Adaptionen insbesondere alternative Trainingsmethoden zur Verbesserung der Herzfrequenzerholung wie die oxidative Sprintmethode oder leichte plyometrische Zirkel sinnvoll sein (Verkhoshansky, 2009). Vor dem beschriebenen Hintergrund erscheint polarisiertes Training langfristig erfolgversprechend, um variierende Trainingsreize zu setzen, die aerobe Leistungsfähigkeit umfassend zu entwickeln und Übertraining zu vermeiden (Wahl et al., 2010).

Bei zusätzlicher Betrachtung der nach Satzende und insbesondere nach Spielende der Resynthese von Kreatinphosphat zugerechneten Sauerstoffaufnahme in Relation zu den im Vorfeld ermittelten Grenzwerten kann darüber hinaus insgesamt eine hohe Auslastung des anaerob alaktaziden Systems im Squash vermutet werden. Vor dem beschriebenen Hintergrund scheint aus energetischer Sicht neben einer hohen aeroben Leistungsfähigkeit auch eine hohe anaerobe alaktazide Leistungsfähigkeit und Kapazität erstrebenswert, welche in der Trainingspraxis per Wechsellmethode innerhalb des Sprint- und Schnellkrafttrainings oder per Maximalkraft- und Explosivkrafttraining beispielsweise mit der Langhantel trainiert werden können (Ribbecke et al., 2018). Ein Training von Maximalkraft, Explosivkraft, Schnellkraft und Reaktivkraft insbesondere der unteren Extremitäten scheint auch mit Blick auf die im Vergleich zu anderen Racketsportarten hohe Rate maximal intensiver Aktionen (kurze Antritte, maximale, zum Teil angesprungene Ausfallschritte, Sprünge und harte Richtungswechsel) mit potentiell steigender Tendenz sinnvoll.

Hinsichtlich des Erhalts einer möglichst hohen Glykolyserate und der Vermeidung von deutlichen Laktatkonzentrationsinduzierten Leistungseinbußen erscheinen unter Berücksichtigung eines potentiell von oxidativen Fasern dominierten Muskelfaserspektrums darüber hinaus Trainingsmethoden sinnvoll, die auf eine Verbesserung der Laktatutilisation in oxidativen Fasern abzielen. Hier könnte FTO-Training (Fast-Twitch-Oxidativ-Training) eine sinnvolle Trainingsintervention darstellen (Verkhoshansky, 2009).

Darüber hinaus scheint vor dem Hintergrund des erstellten Anforderungsprofils ein regelmäßiges Training von Reaktionsschnelligkeit, Koordination und squashspezifischer Agilität sowie die Ausbildung situationsadäquater Lauftechniken erforderlich. Hierzu können Übungen der Lauschule, squashspezifische Laufparcours und ver-

schiedene Ghostingvarianten eingesetzt werden. Im Kontext einer möglichst hohen Beweglichkeit und Bewegungseffizienz sollten zusätzlich defizitorientiert Positions-, Mobilisations-, Stabilitäts- und Kräftigungsübungen als tägliche Routine ins Training implementiert werden.

Insgesamt weisen die Ergebnisse auf die Notwendigkeit hin, ein ergänzendes Athletiktraining in die Trainingsroutine zu integrieren, welches auf die Entwicklung der squashspezifischen körperlichen Leistungsfähigkeit ausgerichtet ist und je nach Trainingsphase 25 – 75 % des Trainings ausmachen sollte. Um dabei den squashspezifischen Trainingsanteil nicht zu vernachlässigen, scheint das wöchentliche Trainingspensum orientiert an den international erfolgreichen deutschen Spielern sukzessiv auf 24 h pro Woche erhöht werden zu müssen.

23 Fazit

Die Ergebnisse dieser Arbeit stellen eine Aktualisierung der bisherigen Daten zur zeitlichen Belastungsstruktur und körperlichen Beanspruchung im Squash dar und erweitern die bisherige Forschung um ein detailliertes energetisches Profil mit Einblick in verschiedene im Spiel auftretende Aktivitäten und Veränderungen im Spielverlauf. Diese lassen unter Berücksichtigung der Resultate von Hughes et al. (2006), Girard et al. (2007) und Murray et al. (2014, 2016a) vermuten, dass sich sowohl die Belastung als auch die Beanspruchung in den letzten zehn Jahren merklich verändert haben. Die von Girard et al. (2007) berichteten Daten zur zeitlichen Belastungsstruktur und Beanspruchung geben einen Hinweis darauf, dass eine potentiell fehlende Adaption des Spielverhaltens nach Umstellung des Regelwerks zunächst eine hinsichtlich des Erhalts der körperlichen Leistungsfähigkeit über das gesamte Spiel zu hohe Beanspruchung bedingt haben könnte. Dabei könnten insbesondere durch die ständige Gefahr des Punktverlusts bedingt lange, hart umkämpfte Ballwechsel zeitweilig zu einer sehr hohen metabolischen Ausbelastung mit gesteigerter Blutlaktatakkumulation geführt haben, in deren Konsequenz die körperliche Leistungsfähigkeit nachfolgend reduziert wurde. Es kann vermutet werden, dass diese (temporären) Leistungseinbußen zumindest teilweise eine Veränderung der Spielweise hin zu einem offensiveren Spiel begünstigt haben könnten, in dem Spieler schneller die Entscheidung suchen. Indizien dafür sind eine Zunahme der Schlagfrequenz, mehr nach vorne und volley gespielte Bälle sowie deutlich weniger lange Ballwechsel. Vor dem Hintergrund einer sich seit der Untersuchung von Girard et al. (2007) deutlich veränderten Belastungsstruktur und dem innerhalb dieser Arbeit nachgewiesenen Zusammenhang von Belastung und Beanspruchung erscheint die bisherige Datenlage zur Beanspruchung für den aktuellen Squash durch die Ergebnisse dieser Arbeit evaluiert werden zu müssen.

Hinsichtlich der zeitlichen Belastungsstruktur bestätigen die Untersuchungsergebnisse prinzipiell die von Murray et al. (2016a) berichteten Daten und betonen den Charakter als intermittierende Mehrfachsprintsportart. Bei einer durchschnittlichen physischen Ausbelastung von $\sim 80\%$ der maximalen Sauerstoffaufnahme erfolgt die Energiebereitstellung im Squash ohne Berücksichtigung der intermittierenden Belastungsstruktur zu 90% aerob. Anaerob wird Energie primär alaktazid (8%) bereitgestellt. Die anaerob laktazide Energiebereitstellung scheint im Squash wider vorheriger Vermutungen unabhängig vom betrachteten Modell jedoch von untergeordneter Bedeutung zu sein.

Nach Erweiterung des konservativen Berechnungsmodells um die netto-spielzeitinklu- dierten Belastungspausen erfolgt die Energiebereitstellung im Squash zwar immer noch überwiegend aerob ($\sim 63\%$), jedoch erhöht sich der Anteil der anaerob alaktazid bereitgestellten Energiemenge auf $\sim 34\%$. Die Beteiligung des anaerob laktaziden Energiestoffwechsels ist auch im erweiterten Modell gering ($\sim 3\%$).

Obwohl die metabolische Leistung spielniveautrennend ist und mit steigender Spiel- stärke zunimmt, sind die metabolische Ausbelastung sowie die anteilige Energiebe- reitstellung sportartcharakteristisch. Ein hoher Belastungsumfang sowie eine hohe effektive Spielzeit scheinen jedoch eine zunehmend aerobe Energiebereitstellung zu begünstigen. Die Interaktion zwischen dem aeroben und anaerob alaktaziden Energiestoffwechsel sowie die negative Korrelation von aerober Leistungsfähigkeit und der Beteiligung des anaerob laktaziden Energiestoffwechsels an der Energie- bereitstellung betonen die enorme Bedeutung der aeroben Leistungsfähigkeit im Squash.

Eine hohe aerobe Leistungsfähigkeit ist unabhängig vom Spielniveau eine der wich- tigsten Komponenten der körperlichen Leistungsfähigkeit im Squash und gewinnt darüber hinaus mit steigendem Spielniveau und zunehmender Spielstärke auf Grund in Folge zunehmender Belastung steigender metabolischer Leistung sukzessiv an Be- deutung. Um auf internationalem Spielniveau erfolgreich agieren zu können, scheint derzeit eine maximale Sauerstoffaufnahme von weit über 60 ml kg^{-1} erforderlich zu sein. Betrachtet man vor dem Hintergrund dieser Empfehlung die maximale Sauer- stoffaufnahme der deutschen Nationalmannschaft, so besteht hier in den meisten Fällen Verbesserungsbedarf. Da die maximale Sauerstoffaufnahme zu einem Groß- teil genetisch determiniert und nur begrenzt trainierbar ist, sollte die Diagnostik der aeroben Leistungsfähigkeit schon innerhalb der Talentförderung im Kinder- und Ju- gendalter stattfinden und ein Training der aeroben Leistungsfähigkeit insbesondere auch auf ein Anheben der individuellen anaeroben Schwelle abzielen.

Im Gegensatz zu Spezialisten in Individualsportarten verfügen Squashspieler ledig- lich über ein Basisniveau an Schnellkraft der unteren Extremitäten und Grundschnel- ligkeit. Die Reaktionsschnelligkeit, die Beweglichkeit und Koordination sind hingegen überdurchschnittlich ausgebildet. Obwohl mit Ausnahme der Beweglichkeit und der Schnellkraft der oberen Extremitäten sämtliche motorische Fähigkeiten mit steigender Spielstärke zunehmend an Bedeutung gewinnen und somit trotz teilweise geringem Leistungsniveau keine trivialen Aspekte der Spielleistung darstellen, scheint neben einer hervorragenden aeroben Leistungsfähigkeit vor allem eine überdurchschnittli- che Reaktionsschnelligkeit ein zentraler Leistungsaspekt zu sein. Darüber hinaus weisen die Ergebnisse darauf hin, dass die mit einer hohen Bewegungsökonomie assoziierte squashspezifische Agilität ein bedeutender Leistungsaspekt ist. Diesbe- züglich scheinen bei den deutschen Spielern noch deutliche Defizite im Vergleich

zur internationalen Spitze zu bestehen. Daneben lässt der Sportartvergleich von Squash und Badminton ein leichtes Beweglichkeitsdefizit im Squash vermuten. Im Kontext einer potentiell hohen Bedeutung einer möglichst gut ausgebildeten anaerob alaktaziden Kapazität, der positiven Korrelation von Sprungkraft und Agilität sowie der mit steigender Spielstärke zunehmenden Anzahl von Antritten und maximalen Ausfallschritten verweist das maximal durchschnittliche Fähigkeitsniveau hinsichtlich der Schnellkraft der unteren Extremitäten auf ein im Squash auf Grund mangelnder Trainingsroutine bisher nicht berücksichtigtes Entwicklungspotential hin.

In der Trainingspraxis sollten somit allgemeine, aber auch spezifische Trainingsformen zur Entwicklung der körperlichen Leistungsfähigkeiten eingesetzt werden, in deren Fokus die Verbesserung der Leistungsfähigkeit des aeroben und anaerob alaktaziden Energiesystems steht. Polarisiertes HVT und HIIT, aber auch Belastungen, die die temporale Belastungsstruktur sowie die Belastungsintensität des Wettkampfspiels simulieren, können eingesetzt werden, um die aerobe Leistungsfähigkeit auf hohem Spielniveau zu verbessern und die squashspezifische Form der Energiebereitstellung zu trainieren. Durch kurze Sprints und maximale Sprünge mit anschließend vollständiger Erholung kann die Leistungsfähigkeit und Kapazität des anaerob alaktaziden Stoffwechsels gesteigert werden. FTO-Training kann eingesetzt werden, um die Laktatutilisation oxidativer Muskelfasern zu verbessern. Spielformen, Ghosting und squashspezifische Laufparcours scheinen zur Verbesserung der squashspezifischen Agilität und Entwicklung ökonomischer Lauftechniken geeignet. Zusätzlich sollte beispielsweise im Zuge eines in die Trainingsroutine implementierten Athletiktrainings das Fähigkeitsniveau hinsichtlich Schnell- und Reaktivkraft und insbesondere der Reaktionsschnelligkeit, Beweglichkeit und Koordination stetig ausgebaut werden. Die innerhalb dieser Studie verwendeten leistungsdagnostischen Tests sowie die auf den Ergebnissen basierend entwickelte Normwerttabelle Squash können zunächst dazu dienen, Talent zu identifizieren und den Effekt von Trainingsinterventionen zu kontrollieren. Sie sollten langfristig jedoch in Kenntnis der wesentlichen Komponenten der körperlichen Leistungsfähigkeit der Sportart spezifiziert werden. Zusätzlich deuten die Ergebnisse dieser Arbeit auf die Notwendigkeit hin, das Trainingspensum mit Blick auf eine zunehmende Konkurrenzfähigkeit der deutschen Elite auf internationalem Spielniveau sukzessiv zu steigern. Orientiert an den bereits erfolgreich auf internationalem Spielniveau agierenden deutschen Spieler sollte ein wöchentliches Trainingspensum von 24 h pro Woche angestrebt werden, von denen je 50 % squashspezifisch und ergänzend im Fitness- und Athletikbereich trainiert werden sollte.

Es konnten nur geringe Schwankungen der kardialen und metabolischen Beanspruchung im Spielverlauf festgestellt werden, die primär auf eine Abnahme der Herzkreislaufökonomie mit zunehmender Spieldauer deuten. Doch weist ein Vergleich des Belastungsprofils der einzelnen Sätze darauf hin, dass die mittleren Sätze

häufig mit geringerer Belastungsintensität gespielt werden als der erste und der entscheidende Satz. In diesem Zusammenhang scheint das Trainieren einer konstanten Spielleistung über das gesamte Spiel neue Potentiale zu eröffnen, um ein Spiel aktiv für sich entscheiden zu können.

Darüber hinaus erscheint es in diesem Kontext und vor dem Hintergrund einer generell hohen Beanspruchung sinnvoll, beanspruchungsregulierende Mechanismen auszubilden und die mentale Stärke der Spieler zu fördern. Für ein mit einer hohen Bewegungsökonomie assoziiertes von Sidesteps dominiertes Bewegungsbild konnte indirekt eine beanspruchungsregulierende Wirkung nachgewiesen werden. Taktisch gesehen können durch eine geschickte Positionierung in der T-Zone lange, explosive Laufwege zum Ball vermieden und durch eine möglichst lange Standzeit auf dem T die Erholungszeit ausgedehnt werden. Auch über die Dauer der Pausen zwischen den Ballwechseln kann prinzipiell aktiv Einfluss auf die Erholung genommen werden. Im Kontext einer aktiven Beanspruchungsregulation erscheint es darüber hinaus auf Grund des hohen Zusammenhanges von metabolischer Leistung und Laufaktionsrate erstrebenswert, Verhaltensmuster auszubilden, um die eigene Laufaktionsrate im Spiel bei Erhöhung der Aktionsrate des Gegners möglichst gering zu halten. Diesbezüglich scheint ein Training zur Verbesserung der Schlagpräzision vor allem bei hoher physischer Beanspruchung, des Bewegungsverhaltens auf dem Court sowie der Reaktionsschnelligkeit, Beweglichkeit und Schnellkraftkraft der unteren Extremitäten erfolgsversprechend zu sein.

Die körperliche Leistungsfähigkeit ist spielniveau- und spielstärkendeterminierend, in spielstärkenhomogenen Begegnungen jedoch nicht der entscheidende Faktor für Erfolg. Über Sieg oder Niederlage scheinen innerhalb dieser Arbeit nicht erhobene Leistungsaspekte wie Antizipation, taktisches Geschick, technische Fertigkeiten oder aber die mentale Stärke zu entscheiden.

Abschließend soll darauf hingewiesen werden, dass die körperliche Leistungsfähigkeit nur einen Aspekt der Spielleistung darstellt, ein auf eine möglichst hohe Spielleistung ausgerichtetes Training jedoch ganzheitlich erfolgen und somit sämtliche Komponenten des Bedingungsgefüges aus Fitness, Technik, Taktik und Psyche beinhalten sollte. Ebenso erscheint es notwendig zu konstatieren, dass eine unreflektierte und pauschale Übertragung der Ergebnisse dieser Arbeit in die Trainingspraxis den individuellen Anforderungen eines Spielers nicht gerecht werden kann. Beim Training des Einzelnen muss der Spielertyp mit seinen individuellen Stärken und Schwächen berücksichtigt werden.

23.1 Limitation

Die wichtigsten Limitationen der vorliegenden Studie ergeben sich aus dem begrenzten Stichprobenumfang mit geringer Anzahl international agierender Spieler, der Realitätsverzerrung durch den Wettkampfsimulationscharakter sowie die Entfernung von Ballwechseln mit anschließender Pause bei außerordentlichen Störungen und der Erstellung des energetischen Profils auf Basis einer Ganzkörperbilanz. Da darüber hinaus innerhalb dieser Arbeit keine exakte Messung von Bewegungsgeschwindigkeiten und zurückgelegten Distanzen erfolgt ist, war eine valide Beschreibung der im Spiel geleisteten physikalischen Arbeit nicht möglich. Die Quantifizierung der aus physikalischer Sicht tatsächlich zu erbringenden Leistung hätte durch die Berechnung des Wirkungsgrades eine differenzierte Analyse der Bewegungsökonomie im klassischen Sinne und damit auch eine Bewertung ihrer Bedeutung für die Spielleistung ermöglicht.

23.2 Ausblick

Innerhalb der Ergebnisdiskussion wurden sowohl in Kapitel 21 als auch in Kapitel 22 kontextual bereits verschiedene Möglichkeiten aufgezeigt, die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen zu evaluieren oder fortzuführen. Abschließend sollen an den Ergebnissen anknüpfende weiterführende Forschungsansätze skizziert werden, durch welche ein weiterer Beitrag in Richtung eines vertieften Sportartverständnisses geleistet werden könnte. Generell sollte es eines der wesentlichen Ziele nachfolgender Forschung sein, die innerhalb dieser Arbeit gewonnen Erkenntnisse durch wiederholende und weiterführende Untersuchungen zu bestätigen. Diesbezüglich scheint ein Forschungsbedarf hinsichtlich der Weiterentwicklung der Methodik zur Erfassung von Belastung, Beanspruchung und Energiebereitstellung insbesondere in offiziellen Wettkämpfen zu bestehen. Hier könnte die Entwicklung von für Indoor-Sportarten geeigneten GPS-Messgeräten oder alternativer Trackingmethoden eine Möglichkeit darstellen, die physikalische Leistung exakt zu quantifizieren. Im Kontext einer möglichst validen Erfassung von Beanspruchung und Energiebereitstellung im Wettkampf erscheint eine weitere Miniaturisierung der portablen Spiroergometriesysteme erforderlich, welche möglicherweise einen Einsatz in offiziellen Squashwettkämpfen ermöglicht. Alternativ wird derzeit zum Einsatz von Wärmebildkameras im Sport geforscht, die künftig eine Beurteilung der Beanspruchung und Energiebereitstellung in offiziellen Wettkämpfen ermöglichen sollen (Koporec et al., 2018).

Darüber hinaus scheint es erstrebenswert, das (physiologische) Anforderungsprofil der Sportart mit Blick auf weitere Subgruppen auszudifferenzieren. Diesbezüglich

deuten die Ergebnisse vorheriger Studien zum Squash beispielsweise darauf hin, dass sich das Anforderungsprofil der Sportart im Übergang vom nationalen Niveau zum internationalen Niveau nochmal verändert (u. a. Hong et al., 1996; Vučković et al., 2009; Murray et al., 2016a). Somit scheinen die Ergebnisse dieser Arbeit keine konkreten Aussagen über auf internationalem Niveau wichtige Komponenten der körperlichen Leistungsfähigkeit zuzulassen. Um dem DSQV eine Konkretisierung ihrer Vorbereitung der Bundeselite auf ein möglichst erfolgreiches Agieren auf internationalem Spielniveau zu ermöglichen, erscheint eine erneute Untersuchung vorwiegend der internationalen Topspieler zur Beschreibung des physiologischen Anforderungsprofils der derzeitigen Weltspitze notwendig.

Da die sich die meisten wissenschaftlichen Untersuchungen zum Anforderungsprofil ausschließlich auf den Herrensquash beziehen, scheint insbesondere hinsichtlich des Anforderungsprofils von Damensquash enormer Forschungsbedarf zu bestehen. Hier sind auf Grund physiologischer Unterschiede zwischen den Geschlechtern vor allem Unterschiede hinsichtlich Schlaghärte und Spieltempo zu erwarten.

Auch scheint es von Interesse zu sein, den Einfluss von unterschiedlichem taktischen Verhalten auf die Beanspruchung und Energiebereitstellung im Spiel zu untersuchen.

Abschließend soll nochmal darauf aufmerksam gemacht werden, dass ein Vergleich der Ergebnisse dieser Arbeit zu Belastung und Beanspruchung mit denen von Girard et al. (2007) darauf hindeutet, dass sich sowohl die temporale Belastungsstruktur als auch das Aktivitätsprofil seit Einführung des neuen Regelwerks bis heute deutlich verändert haben und somit ältere wissenschaftliche Erkenntnisse zur Beanspruchung, Energiebereitstellung und körperlichen Leistungsfähigkeit aktuell keine oder nur noch bedingt Gültigkeit für Squash zu haben scheinen. Da bisher ausschließlich Studien existieren, die Squash auf Unterschiede vor und nach Regeländerung untersucht haben, erscheint zur Verifizierung dieser Vermutung und zur Ableitung von Entwicklungstrends eine Longitudinalstudie zur zeitlichen Belastungsstruktur und den Aktivitäten auf dem Court vom Zeitpunkt der Regeländerung bis heute erforderlich zu sein.

Literaturverzeichnis

- [1] Abdullahi, Y., Toriola, A. T., Ter Goon, D., Paul, Y., Uzochukwu Igbokwe, N., Abimbade Suarau M.: *Anthropometric and Motor Performance Characteristics of Nigerian Badminton Players*. Asian Journal of Scientific Research, 10, 244-251, 2017.
- [2] Albay, M., Tutkun, D., Agaoglu, Y. S., Canikli, A., Albay, F.: *The investigation of some motor values and anthropometric characteristics of handball, volleyball and football university teams*. Spormetre Journal of Physical Education and Sport Sciences, 4(1), 13-20, 2008.
- [3] American College of Sports Medicine: *ACSM's Guidelines for Exercise Testing and Prescription*. Lippincott, Williams & Wilkins, 8, Philadelphia 2009.
- [4] Astrand, I., Astrand, P. O., Christensen, E., Hedman, R.: *Intermittent muscular work*. Acta Physiologica Scandinavica, 48, 448-453, 1960.
- [5] Bachl, N., Kinzlbauer, M.: *Metabolische Funktion bei Belastung*. In: *Ergometrie*. Löllgen, H., Erland, E., Gitt, A, K. (eds.), Springer-Verlag, 13-17, 2010.
- [6] Balsom, P. D., Seger, J. Y., Sjödin, B., Ekblom, B.: *Physiological responses to maximal intensity intermittent exercise*. European Journal of Applied Physiology, 65, 144-149, 1992.
- [7] Bannwarth, H., Kremer, B. P., Schulz, A.: *Basiswissen Physik, Chemie und Biochemie*. 2., überarbeitete und erweiterte Auflage, Springer, Heidelberg Dordrecht London New York, 2011.
- [8] Banzer, W., Pfeifer, K., Vogt, L. (eds.): *Funktionsdiagnostik des Bewegungssystems in der Sportmedizin*. Springer, 2004.
- [9] Baum, K., Schuster, S.: *Der Energieumsatz in der Nachbelastungsphase: Ein wesentlicher Beitrag zur Gewichtsreduktion?* Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin, 59(9), 110-114, 2008.
- [10] Beaudin, P., Zapiec, C., Montgomery, D.: *Heart Rate Response and Lactic Acid Concentration in Squash Players*. Research Quarterly, 49, 406-412, 1978.
- [11] Beck, J., Bös, K.: *Normwerte motorischer Leistungsfähigkeit*. Strauß, Köln 1995.

- [12] Beneke, R., Pollmann, C., Bleif, I., Leithäuser, R. M., Hütler, M.: *How anaerobic is the Wingate anaerobic test for humans?* European Journal of Applied Physiology, 87, 388-398, 2002.
- [13] Beneke, R., Beyer, T., Jachner, C., Erasmus, J., Hütler, M.: *Energetic of karate kumite.* European Journal of Applied Physiology, 92, 518-523, 2004.
- [14] Beneke, R., Hütler, M., Jung, M., Leithäuser, R. M.: *Modelling the blood lactate kinetics at maximal short term exercise conditions in children, adolescents and adults.* Journal of Applied Physiology, 99, 499-504, 2005.
- [15] Beneke, R., Jumah, M. D., Leithäuser, R. M.: *Modelling the lactate response to short-term all out exercise.* Dymanic Medicine, 6(10), 1-7, 2007.
- [16] Blansky, B. A., Elliot, B. C., Bloomfield, J.: *Telemetred heart rate responses of middle aged sedentary males, middle-aged active males and A grade male squash players.* Medical Journal of Australia, 2, 477-481, 1973.
- [17] Blume, D.: *Zu einigen wissenschaftlichen Grundpositionen für die Untersuchung der koordinativen Fähigkeiten.* Theorie und Praxis der Körperkultur, 27, 29-36, 1978.
- [18] Bieslaski, H.-K., Grimm, P.: *Taschenatlas Ernährung.* 5. überarbeitete u. erweiterte Auflage, Thieme-Verlag, Stuttgart 2011.
- [19] Billaut, F., Giacomoni, M., Flagairett, G.: *Maximal intermittent cycling exercise: effects of recovery duration and gender.* Applied Physiology, 95, 1632-1637, 2003.
- [20] Boes, K.: *Handbuch Sportmotorische Tests.* Hofgrete, Göttingen 1987.
- [21] Boes, K.: *Fitness testen und trainieren.* Copress, München 1996.
- [22] Boes, K.: *Handbuch Motorische Tests.* Hofgrete, Göttingen 2001.
- [23] Boldt, F., Berbalk, A., Halle, M., Hoffmann, G., Löllgen, H., Schmidt Trucksäß, A., Urhausen, A., Völker, K., Zuestegge, M.: *Leitlinien zur Belastungsuntersuchung in der Sportmedizin.* DGSP, März 2002.
- [24] Borg, G.: *Anstrengungsempfinden und körperliche Aktivität.* Deutsches Ärzteblatt, 101(15), 1016-1021, 2004.
- [25] Brady, H. R., Kinirons, M., Lynch, T., Ohman, E. M., Tormey, W., O'Malley, K. M., Horgan, J. H.: *Heart rate and metabolic response to competitive squash in veteran players: identification of risk factors for sudden cardiac death.* European Heart Journal, 10(11), 1029-1035, 1989.

- [26] Brooks, F. B. C., Winter, E. M.: *A comparison of 3 measures of short-duration, maximal performance in trained squash players*. Journal of Human Movement Studies, 11, 105-112, 1985.
- [27] Brown, D. Winter., E. M.: *Heart rate response in squash during competitive match play*. Journal of Sports Science, 1995.
- [28] Brown, D., Weigand, D. A., Winter, E. M.: *Maximum oxygen uptake in junior and senior elite squash players*. In: *Science and Racket Sports II*. Lees, A., Maynard, I., Hughes, M., Reilly, T. (eds.), E % FN Spon, 14-19, London 1998.
- [29] Bruce, R. A, Cooper, M. N, Gey, G. O., Fisher, L.D., Peterson, DR. *Variations in responses to maximal exercise in health and in cardiovascular disease*. Angiology, 24(11), 691-702, 1973.
- [30] Bruscia, G.: *Handbuch Functional Training*. Meyer & Meyer-Verlag, Aachen 2014.
- [31] Bunc, V., Süß, V.: *Physiological characteristics of young czech squash players*. Acta Universitatis Carolinae / Kinanthropologica, 40, 19-25, 2004.
- [32] Buote, K., Jomha, N., Adeeb, S.: *Quantifying Motion and T Dominance of Elite Squash Players*. Journal of Sport and Human Performance, 4(2), 2016.
- [33] Bussweiler, J.: *Das energetische Profil von Shotokan-Karate-Kata*. Dissertation an der Sportwissenschaftlichen Fakultät der Universität Leipzig, Lehmanns Media-Verlag, Berlin 2014.
- [34] Cabello, D. M., Gonzalez-Badillo, J. J.: *Analysis of the characteristics of competitive badminton*. British Journal of Sports Medicine, 37, 62-66, 2003.
- [35] Chahar, P. S.: *Physiological Profile of High and Low Performance Squash Players: A Discriminant Approach*. World Journal of Sport Sciences, 9(2), 17-22, 2014.
- [36] Chapman, A. E., Zuyderhoff, R. N.: *Squash ball mechanics and applications for play*. Canadian Journal of Applied Sport Science, 11, 47-54, 1986.
- [37] Chen, M. J., Fan, X., Moe, S. T.: *Criterion-related validity of the Borg ratings of perceived exertion scale in healthy individuals: a meta-analysis*. Journal of Sport Science, 20(11), 873-899, 2002.
- [38] Chen, Y. L., Chen, C. C., Hsia, P. Y., Lin, S. K.: *Relationships of Borg's RRE 6-20 scale and heart rate in dynamic and static exercise among a sample of young taiwanese men*. Perceptual & Motor Skills: Physical Development & Measurement, 117(3), 971-982, 2013.

- [39] Chin, M.-K., Steininger, K., So, R. C. H., Clark, C. R.: *Physiological profiles and sport specific fitness of Asian elite squash players*. British Journal of Sports Medicine, 29(3), 158-164, 1995.
- [40] Ciba-Geigy: *Wissenschaftliche Tabellen Geigy. Körperflüssigkeiten*. Ciba-Geigy, 225-228, Basel 1985.
- [41] Coad, D., Rasmussen, B., Mikkelsen, F.: *Physical demands of recreational badminton*. In: *Science in Racquet Sports*. Terauds, J. (eds.), Del Mar, CA, Academic Publishers, 45-54, 1979.
- [42] Cureton, K. J., Sparling, P.B., Evans, B. W., Johnson, S. M., Kong, U. D., Purvis, J. W.: *Effect of experimental alterations in excess weight on aerobic capacity and distance running performance*. Medicine and Science in Sports, 10, 194-199, 1978.
- [43] Davis, B., Philipps, R., Roscoe, J., Roscoe, D.: *Physical Education and the Study of Sport*. Mosby, UK London 2000.
- [44] Davis, P., Wittekind, A., Beneke, R.: *Amateur Boxing: Activity Profile of Winners and Losers*. International Journal of Sports Physiology and Performance, 2012.
- [45] Davis, P., Leithäuser, R. M., Beneke, R.: *The Energetics of Semicontact 3x2-min Amateur Boxing*. International Journal of Sports Physiology and Performance, 9(2), 233-239, 2014.
- [46] de Marées, H.: *Sportphysiologie*. Sportverlag Strauß, 9. Auflage, Bochum 2003.
- [47] di Prampero, P. E., Margaria, R.: *Relationship between O₂ consumption, high energy phosphates and the kinetics of the O₂ debt in exercise*. Pflügers Archiv für die gesamte Physiologie, 304, 11-19, 1968.
- [48] di Prampero, P. E.: *Energetics of muscular exercise*. Reviews of physiology, biochemistry and pharmacology, 89, 143-222, 1981.
- [49] di Prampero, P. E., Meyer, M., Cerretelli, P., Piiper, J.: *Energy sources and mechanical efficiency of anaerobic work in dog gastrocnemius*. Pflügers Archiv für die gesamte Physiologie, 389(3), 257-262, 1981.
- [50] di Prampero, P. E., Ferretti, G.: *The energetics of anaerobic muscle metabolism: a reappraisal of older and recent concepts*. Respiration Physiology, 118, 103-115, 1999.
- [51] Docherty, D., Howe, B.: *Heart rate response of squash players relative to their skill level*. Australian Journal of Sports Medicine, 10, 90-92, 1978.

- [52] Docherty, D.: *A comparison of heart rate responses in racquet games*. British Journal of Sports Medicine, 16(2), 96-100, 1982.
- [53] Döring, N., Bortz, J.: *Forschungsmethoden und Evaluation*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2016.
- [54] Dörr, C.: *Untersuchung der Validität verschiedener Laktatschwellenkonzepte an Ausdauersportlern*. Dissertation, Justus-Liebig-Universität Gießen, 2010.
- [55] Drinkwater, B. J., Pyne, D. B., McKenna, M. J.: *Design and Interpretation of Anthropometric and Fitness Testing of Basketball Players*. Sports Medicine, 38(7), 565-578, 2008.
- [56] Duthie, G., Pyne, D., Hooper, S.: *Applied physiology and game analysis of rugby union*. Sports Medicine, 33(13), 973-991, 2003.
- [57] EKF-diagnostic: *Bedienungsanleitung C-Line. Analysator für Glukose und Laktat*. EKF-diagnostic GmbH, Barleben 2004.
- [58] Eime, R., Finch, C.: *Have the attitudes of Australian squash players towards protective eyewear changed over the past decade?* British Journal of Sports Medicine, 36, 442-445, 2002.
- [59] Essén, B., Hagenfeldt, L., Kaijser, L.: *Utilization of blood-borne and intramuscular substrates during continuous and intermittent exercise in man*. Journal of Physiology 265, 489-506, 1977.
- [60] Eubank, C., Messenger, N.: *Dynamic moves and stepping patterns typical to the game of squash*. Journal of Sports Sciences, 18, 471-472, 2000.
- [61] Faude, O., Meyer, T., Rosenberger, F.: *Physiological characteristics of badminton match play*. European Journal of Applied Physiology, 100(4), 479-485, 2007.
- [62] Fernández-Fernández, J., Sanz-Rivas, D., Sánchez-Muñoz, C., Pluim, B. M., Tiemessen, I., Méndez-Villanueva, A.: *A comparison of the activity profile and physiological demands between advanced and recreational veteran tennis players*. Journal of Strength and Conditioning Research, 0, 1-7, 2009.
- [63] Franke, J., Zimek, R., Platen, P.: *Vergleichende Untersuchung zur Bestimmung der maximalen Sauerstoffaufnahme bei Sportspielern*. Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin, 60(7), 179, 2009.
- [64] Friedmann-Bette, B.: *Die Spiroergometrie in der sportmedizinischen Leistungsdiagnostik*. Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin, 62(1), 10-15, 2011.

- [65] Gaitanos, G. C., Williams, C., Boobis, L. H., Brooks, S.: *Human muscle metabolism during intermittent maximal exercise*. The American Physiological Society, 712-719, 1993.
- [66] Gerber, T.: *The metabolic response of high intensity intermittent exercise in healthy untrained adults*. Dissertation, College of Health and Biomedicine, Victoria University, 2003.
- [67] Gillam, I., Siviour, C., Ellis, L., Brown, P.: *The On-Court Energy Demands of Squash on Elite Level Players*. In: Draper J, (ed.): *Third report on the national sport research program*. Australian Sports Commission, Canberra 1990.
- [68] Girard, O., Sciberras, P., Habrad, P., Hot, R., Chevalier, R., Millet, G. P.: *Specific incremental test in elite squash players*. British Journal of Sports Medicine, 39, 921-926, 2005.
- [69] Girard, O., Chevalier, R., Habrad, M., Sciberras, P., Hol, P., Millet, G. P.: *Game analysis and energy requirements of elite squash*. Journal of Strength Conditioning and Resistance, 2, 909-914, 2007.
- [70] Glies., D., Draper, N., Neil, W.: *Validity of the Polar V800 heart rate monitor to measure RR intervals at rest*. European Journal of Applied Physiology, 116, 563–571, 2016.
- [71] Grosser, M., Strarischka, S., Zimmermann, E.: *Das neue Konditionstraining. Grundlagen, Methoden, Leistungssteigerung, Übungen, Trainingsprogramme*. BLV Buchverlag, Auflage: 12, 2012.
- [72] Güllich, A., Schmidtbleicher, D.: *Methodik des Krafttrainings*. In: *Muskelkrafttraining*. Sievers, M. (Hrsg.), Band 1, 2000.
- [73] Hansen, R. D.: *Seasonal variability in physiological strain: Matching performance to demand*. In: *Science and Racket Sports*. Reilly, T., Hughes, M., Lees, A. (eds.), 14-20, Taylor & Francis, 1995.
- [74] Harris, R. C., Hultmann, E., Nordsejö, L. O.: *Glycogen, glycolytic intermediates and high-energy phosphates determined in biopsy samples of musculus quadriceps femoris of man in rest*. Scandinavian Journal of Clinical and Laboratory Investigation, 33, 119-120, 1974.
- [75] Haymann, K., Meseck, U.: *Lehrbuch Squash*. BLV Buchverlag, München 1989.
- [76] Heck, H., Schulz, H.: *Methoden der anaeroben Leistungsdiagnostik*. Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin, 53(7), 202-212, 2002.

- [77] Heck, H.: *Muskulärer Energiestoffwechsel und sportliche Aktivität*. Blickpunkt der Mann, 4(4), 23-28, 2006.
- [78] Heller, J.: *Physiological profiles of elite badminton players: Aspects of age and gender*. British Journal of Sports Medicine, 44(Suppl I), i1-i82, 2010.
- [79] Hille, T., Geiger, L. V.: *Mathematische Beschreibung der Laktatkinetik beim Stufentest und Umsetzung in einer datenbankorientierten Analyse-Software*. Leistungssport 5(93), 46-59, 1993.
- [80] Heck, H., Schulz, H.: *Methoden der anaeroben Leistungsdiagnostik*. Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin, 53(7+8), 202-212, 2002.
- [81] Hohmann, A., Lames, M., Letzelter, M.: *Einführung in die Trainingswissenschaften*. Limpert Verlag, Wiebelsheim, 2002.
- [82] Hohmann, A., Lames, M., Letzelter, M.: *Einführung in die Trainingswissenschaften*. 4., überarbeitete und erweiterte Auflage, Limpert Verlag, Wiebelsheim, 2007.
- [83] Hollmann, W., Hettinger, T.: *Sportmedizin. Grundlagen für Arbeit, Training und Präventivmedizin*. 4. Auflage, Schattauer Verlag, Stuttgart 2000.
- [84] Hollmann, W., Strüder, H., Predel, H.-G., Tagarakis, C.: *Spiroergometrie. Kardiopulmonale Leistungsdiagnostik des Gesunden und Kranken*. Schattauer, Stuttgart 2006.
- [85] Hollmann, W., Strüder, H. K.: *Sportmedizin. Grundlage für körperliche Aktivität, Training und Präventivmedizin*. Schattauer, Stuttgart 2009.
- [86] Hong, Y., Chi-Ming Chang, T., Wan-kan Chan, D.: *A Comparison of the Game Strategies Employed by Nation*. Journal of Human Movement Studies, 31, 89-104, 1996.
- [87] Hong, Y., Robinson, P. D., Chan, W. K., Clark, C. R., Choi, T.: *Notational Analysis on Game Strategy Used by the World's Top Male Squash Players in International Competition*. The Australian Journal of Science and Medicine in Sport, 28(1), 18-23, 1996.
- [88] Hughes, M.: *A comparison of the patterns of play of squash*. In: *International Ergonomics*. Brown, I. D., Goldsmith, R., Coombes, K., Sinclair, M. A. (eds.), 139-141, London 1985.
- [89] Hughes, M.: *A review of patterns of play in squash at different competitive levels*. In: *Sport Science*. Watkins, J., Reilly, T., Burwitz, L. (eds.), 363-368, London 1986.

- [90] Hughes, M. D., McGarry, T.: *Computerised notational analysis of squash*. In: *Science in Squash*. Hughes, M. D. (ed.), Polytechnic., Liverpool 1989.
- [91] Hughes, M. D., Franks, I. M.: *A time motion analysis of squash players using a mixed image video tracking system*. *Ergonomics*, 37, 23-29, 1991.
- [92] Hughes, M., Franks, I. M.: *Dynamic patterns of movement of squash players of different standards in winning and losing rallies*. *Ergonomics*, 37(1), 23-29, 1994.
- [93] Hughes, M. D., Knight, P.: *Playing patterns of elite squash players, using English and point-per-rally scoring*. In: *Science and Racket Sports*. Reilly, T., Hughes, M., Lees, A. (eds.), 257-259, Taylor & Francis, 1995.
- [94] Hughes, M. D., Franks, I. M.: *Notational Analysis of Sport*. E & FN Spon, London 1997.
- [95] Hughes, M., Robertson, C.: *Using computerised notational analysis to create a template for elite squash and its subsequent use in designing hand notation system for player development*. In: *Science and Racket Sports II*. Lees, A., Maynard, I., Hughes, M., Reilly, T. (eds.), E & FN Spon, 227-234, London 1998.
- [96] Hughes, M., Evans, S., Wells, J.: *Establishing normative profiles in performance analysis*. *International Journal of Performance Analysis in Sport*, 1(1), 1-26, 2001.
- [97] Hughes, M. D., Barlett, R. M.: *The use of performance indicators in performance analysis*. *Journal of Sports Science*, 20(10), 739-754, 2002.
- [98] Hughes, M.: *Notational analysis - a mathematical perspective*. *International Journal of Performance Analysis in Sport*, 4(2), 97-139, 2004.
- [99] Hughes, M., Franks, I.: *Notational analysis of sports*. Routledge, London and New York 2004.
- [100] Hughes, M. D., Watts, A., White, C., Hughes, M. T.: *Game structures of elite male squash under different rules*. IV Congreso Mundial de Ciencia y Deportes de Raquet, 21-23, Madrid 2006.
- [101] Hughes, M. D., Hughes, M. T., Behan, H.: *Computerized notational analysis and performance profiling in racket sports*. Lees, A., Cabello, D., Torres, G. (eds.), 220-226, Routledge, New York 2009.
- [102] Janssen, P. G. J. M., Weineck, J.: *Ausdauertraining. Trainingssteuerung über die Herzfrequenz- und Milchsäurebestimmung*. 3. Auflage, Spitta, 2003.

- [103] Jeukendrup, A. E., Wallis, G. A: *Measurement of Substrate Oxidation During Exercise by Means of Gas Exchange Measurements*. International Journal of Sports Medicine, 26, 28-37, 2005.
- [104] Jumah, M. D.: *Analyse und Vergleich von Methoden zur Bestimmung der anaeroben Kapazität und Leistungsfähigkeit bei Freizeitsportlern auf dem Fahrradergometer*. Dissertation am Institut für Sportmedizin der Medizinischen Fakultät Charité -Universitätsmedizin Berlin, November 2009.
- [105] Jones, T. W., Williams, B. K., Kilgallen, C., Horobenau, C., Shillabeer, C., Murray, A., Cardinale, M.: *A review of the performance requirements of squash*. International Journal of Sports Science & Coaching, 0(0), 1–10, 2018.
- [106] Kaplan, D. S., Akcan, F., Çakir, Z., Kilic, T., Yildirim, C.: *Visuomotor and audiomotor reaktion time in elite and non-elite badminton players*. European Journal of Physical Education and Sport Science, 3(1), 84-93, 2017.
- [107] Kindermann, W.: *Standards der Sportmedizin: Anaerobe Schwelle*. Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin, 55(6), 161-162, 2004.
- [108] Knechtle, B.: *Die Energiebereitstellung im Muskel*. Fitness Tribune, 65, 82-85, 2000.
- [109] Knuttgen, H. G.: *Oxygen dept after submaximal exercise*. Journal of Applied Physiology, 29, 651-657, 1970.
- [110] Koch, H. J., Rachka, C.: *Empirische und mechanische Auswertungsmodelle für Laktatkonzentrationskurven im Dauerleistungstest*. Nagoya Journal of Medical Science, 62, 127-134, 1999.
- [111] Koporec, G., Vučković, G., Milić, R., Perš. J.: *Quantitative Contact-Less Estimation of Energy Expenditure from Video and 3D Imagery*. Sensors 2018, 18, 2435, 1-32.
- [112] Konrci, M., Furjan-Mandic, G., Kondric, L., Gabaglio, A.: *Physiological demands and testing in table tennis*. International Journal of Table Tennis Sciences, 6, 165-170, 2010.
- [113] Korhonen, M. T., Mero, A., Suominen, H.: *Age-Related Differences in 100-m Sprint Performance in Male and Female Master Runners*. Physical Fitness and Performance, 35(8), 1419-1428, 2003.
- [114] Krasilshchikov, O.: *Fitness profile of malaysian adolescent squash players*. Movement, Health & Excercise, 3, 39-47, 2014.

- [115] Krogh, A., Lindhard, J.: *The changes in respiration at the transition from work to rest*. Journal of Physiology, 53, 431-437, 1920.
- [116] Kroidl, R. F., Schwarz, S., Lehnigk, G.: *Kursbuch Spiroergometrie. Technik und Befundung verständlich gemacht*. Georg Thieme Verlag, Stuttgart-New York 2007.
- [117] Kroidl, R., Schwarz, S., Lehnigk, B., Fritsch, J.: *Kursbuch Spiroergometrie: Technik und Befundung verständlich gemacht*. Thieme-Verlag, Stuttgart-New York 2010.
- [118] Krell-Rösch, J., Tittbach, S., Bös, K.: *Sportmotorischer Test für Erwachsene: Tests für Fitness-Einsteiger und Fortgeschrittene*. In: *Funktionales Training mit Hand- und Kleingeräten*. Kempf, H.-D. (ed.), Springer Medizin, Berlin-Heidelberg 2014.
- [119] Kuntze, G., Mansfield, N., Sellers, W.: *A biomechanical analysis of common lunge tasks in badminton*. Journal of Sports Sciences, 28 (2), 183–191, 2010.
- [120] Laffaye, G., Phmosoupha, M., Dor, F.: *Changes in the Game Characteristics of a Badminton Match: A Longitudinal Study through the Olympic Game Finals Analysis in Men's Singles*. Journal of Sports Science and Medicine, 14, 584-590, 2015.
- [121] Lang, F., Lang, P.: *Basiswissen Physiologie*. Springer Medizin Verlag, Berlin-Heidelberg 2007.
- [122] Latzel, R., Hoos, O., Stier, S., Kaufmann, S., Fresz, V., Reim, D., Beneke, R.: *Energetic Profile of the Basketball Exercise Simulation Test in Junior Elite Players*. International Journal of Sports Physiology and Performance, 13(6), 810-815, 2017.
- [123] Léger, L. A., Lampert, J. A.: *A maximale multistage 20-m shuttle run test to predict relative $\text{VO}_{2\text{max}}$* . European Journal of Applied Physiology, 49(1), 1-12, 1982.
- [124] Leyk, D., Baum, K., Wamser, P., Selle, K., Hoffmann, U., Essfeld, D.: *Lactate concentrations during intermittent exercise: Squash as an example for constant lactate levels above 4 mmol l⁻¹*. Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin, 47(11/12), 551-555, 1996.
- [125] Lieshout, K. A.: *Physiological profile of elite junior badminton players in south africa*. Dissertation, Department of Sport and Movement Studies, Rand Afrikaans University, Johannesburg 2002.

- [126] Lockie, R. G., Murphy, A. J., Knight, T. J., de Jonge, X. A. J. : *Factors that differentiate acceleration ability in field sport athletes*. The Journal of Strength & Conditioning Research, 25(10),2704-2714, 2011.
- [127] Löffler, G, Petrides, P. E., Heinrich, P. C., Müller, M., Graeve, L. (eds.): *Biochemie des Menschen*. Springer Medizin, Heidelberg 2014.
- [128] Loosch, E.: *Allgemeine Bewegungslehre*. Limpert, Wiebelsheim 1999.
- [129] Loots, S. L., Thiart, B. F.: *Energy demand of league and social players*. South African journal for research in sport, physical education and recreation, 6, 13-19, 1983.
- [130] Löllgen, H.: *Das Anstrengungsempfinden*. Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin, 55(11), 299-300, 2004.
- [131] Löllgen, H., Erdmann, E., Gitta, A. (eds.): *Ergometrie. Belastungsuntersuchung in Klinik und Praxis*. Springer Medizin Verlag, Heidelberg 2010.
- [132] Löllgen, H., Steinberg, T.: *Physiologische Grundlagen der Belastung*. In: *Ergometrie*. Löllgen, H., Erland, E., Gitt, A, K. (eds.), Springer-Verlag, 10-12, 2010.
- [133] Macfarlane, D. J., Wong, P.: *Validity, reliability and stability of the portable Cortex Metamax 3B gas analysis system*. European Journal of Applied Physiology, 112(7), 2537-2549, 2012.
- [134] Maerz, G. Y.: *Über den Einfluss unterschiedlicher Maskensysteme in der Spiroergometrie auf die arteriellen Blutgase bei maximaler Ergometerarbeit*. Inaugural-Dissertation zur Erlangung der Doktorwürde der Hohen Medizinischen Fakultät der Universität zu Köln, Januar 2011.
- [135] Mader, A., Liesen, H., Heck, H., Phillipi, H, Rost, R., Schürch, P., Hollmann, W.: *Zur Beurteilung der sportartspezifischen Ausdauerleistungsfähigkeit im Labor*. Sportarzt Sportmedizin, 27, 80-88, 109-112, 1976.
- [136] Mader, A., Heck, H.: *Möglichkeiten und Aufgaben in der Forschung und Praxis der Humanleistungsphysiologie*. Spectrum der Sportwissenschaften, 3, 5–54,1991.
- [137] Mahoney, C. A., Sharp, N. C. C.: *The physiological profile of elite junior squash players*. In: *Science and Racket Sports*. Reilly, T., Hughes, M., Lees, A. (eds.), 76-80, Taylor & Francis, 1995.

- [138] Mahoney, C. A., Todd, M. K.: *The psychological skills of Britain's top young squash players*. In: *Science and Racket Sports II*. Lees, A., Maynard, I., Hughes, M., Reilly, T. (eds.), E & FN Spon, 168-174, London 1998.
- [139] Majumdar, P., Khanna, G. L., Malik, V.: *Physiological analysis to quantify training load in badminton*. British Journal of Sports Medicine, 31(4), 342–345, 1997.
- [140] Majumdar, P., Mandal, M., Yadav, D.: *The Effectiveness of Training Routine with Reference to the Physiological Demand of Squash Match Play*. International Journal of Applied Sports Sciences, 21(1), 28-44, 2009.
- [141] Malagoli, L. I., di Michele, R., Franco, M.: *Performance indicators in table tennis: a review of the literature*. The 12th ITTF Sports Science Congress, Rotterdam, May 5-7, 2011.
- [142] Martin, D., Carl, K., Lehnertz, K.: *Handbuch Trainingslehre*. Hofmann, Schorn-dorf, 2001.
- [143] Mellor, S., Hughes, M. D., Reilly, T., Robertson, K.: *Physiological profiles of squash players of different standards*. 72–75, E & FN Spon, London 1995.
- [144] Meyer, T., Kindermann, W.: *Die maximale Sauerstoffaufnahme*. Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin, 50, 285-286, 1999.
- [145] Meyer, T.: *Der respiratorische Quotient (RQ)*. Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin, 54(1), 29-30, 2003.
- [146] Meckel, Y. Hophy, A., Dunskey, A., Eliakim, A.: *Relationship between physical characteristics and ranking of young tennis players*. Central European Journal of Sport Sciences and Medicine, 10(2), 5-12, 2015.
- [147] Mercier, M., Beillot, J., Gratas, A., Rochcongar, P., Lessard, Y.: *Adaption to work load in squash players: Laboratory tests and on-court recordings*. Journal of Applied Physiology, 84, 2138-2142, 1998.
- [148] Meseck, U., Herwig, M., Schweinitz, L.: *Squash*. Limpert-Verlag, Wiebelsheim 2003.
- [149] Montpetit R. R. , Léger, L., Girardin, Y.: *Le racquetball, le squash et la condition physique*. Le Médecin du Québec, 12, 119-123, 1977.
- [150] Montpetit, R. R., Beauchamp, L., Léger, L.: *Energy requirements of squash and racket ball*. The Physican Sportsmedicine, 15, 106-112, 1987.

- [151] Montpetit, R. R.: *Applied physiology of squash*. Sports Medicine, 10, 31-40, 1990.
- [152] Moosburger, K.: *Die muskuläre Energiebereitstellung im Sport*. Sportmagazin, 2009.
- [153] Morante, S., Brotherhood, J.: *Match characteristics of professional singles tennis*. Medicine and Science in Tennis, 10(3), 12–13, 2006.
- [154] Müller, E., Benko, U., Raschner, C., Schwameder, H.: *Specific fitness training and testing in competitive sports*. Medicine & Science in Sports & Exercise, 32, 216-220, 2000.
- [155] Munk, K.: *Taschenlehrbuch Biochemie-Zellbiologie*. Georg Thieme Verlag KG, Stuttgart 2008.
- [156] Murray, S., Hughes, M.: *Tactical performance profiling in elite level senior squash*. In: Hughes, M., Franks, I. M (eds.), Cardiff: CPA, UWIC., 185-194, 2001. Presented at World Conference of Performance Analysis and Computers in Sport 2001.
- [157] Murray, S, James, N., Dineen, P., Hughes, M. D., Vučkovič, G.,.: *The effect on changing scoring system on game related activity in squash*. In: *Performance Analysis of Sport IX*. Peters, D. M., O'Donoghue, P. (eds.), 145-149, Routledge, London, New York 2014.
- [158] Murray, S, James, N., Hughes, M. D., Perš. J., Mandeljc, R., Vučkovič, G.: *Effects of rule changes oh physical demands and shot charateristics of elite-standard men's squash and implications for training*. Journal of Sports Sciences, 1-5, 2016.
- [159] Murray, S., Hughes, M., James, N., Vučkovič, G.: *The Science of Sport. Squash*. The Crowood Press, Ramsbury, Marlborough 2016.
- [160] Nelson, D., Cox, M.: *Lehninger Biochemie*. 3. Neuauflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York 2001.
- [161] Neumann, G.: *Metabole Grundlagen für die Beurteilung der Bewegungstherapie unter Beachtung der aerob-anaeroben Stoffwechselschwelle*. Zeitschrift für Physiotherapie, 36(2), 131-138, 1984.
- [162] Northcote, R. J., MacFarlane, P., Ballantyne, D.: *Ambulatory electrocardiography in squash players*. British Heart Journal, 50, 372-377, 1983.
- [163] Norton, K., Olds, T.: *Morphological evolution of athletes over the 20th century: Causes and consequences*. Sports Medicine, 31(11), 763-783, 2008.

- [164] Oberger, J.: *Sportmotorische Tests im Kindes- und Jugendalter. Normwertbildung - Auswertungsstrategien - Interpretationsmöglichkeiten. Überprüfung anhand der Daten des Motorik Moduls (MoMo)*. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2014.
- [165] Obra, C. D. N. N.: *Correlates of Anthropometric and Fitness Measures on Playing Positions of Ilocos Notre Cellegiate Basketball Players*. JPAIR 1, 176-192, 2008.
- [166] Omosegaard, B.: *Physical Training for Badminton*. International Badminton Federation, Dänemark 1996.
- [167] Panissa, V., Fukuda, D. H., Caldeira, R. S., Gerosa-Neto, J., Lira, F. S., Zagatto, A. M., Franchini, E.: *Is Oxygen Uptake Measurement Enough to Estimate Energy Expenditure During High-Intensity Intermittent Exercise? Quantification of Anaerobic Contribution by Different Methods*. Frontiers in Physiology, 9, 1-8, 2018.
- [168] Paradisis, G. P., Zacharogiannis, E., Mandila, D., Smirtiotou, Argeitaki, P., Cooke, C., B.: *Multi-Stage 20-m Shuttle Run Fitness Test, Maximal Oxygen Uptake and Velocity at Maximal Oxygen Uptake*. Journal of Human Kinetics, 41, 81-87, 2014.
- [169] Pereira, A., Wells, J., Hughes, M.: *Notational analysis of elite womens movement patterns*. Centre for Performance Analysis, UWIC, Cyncoed, Cardiff, CF2 6XD, pass.com, 223-238, 2001.
- [170] Phomsoupha, M., Laffaye, G.: *The Science of Badminton: Game Characteristics, Anthropometry, Physiology, Visual Fitness and Biomechanics*. Sports Medicine, 45, 473–495, 2015.
- [171] Prenz, A.: *Äquilibrationseffekt im Sport: Eine Studie zu den Effekten der Befindlichkeitsänderungen*. Diplomica Verlag, Hamburg, 2012.
- [172] Pyke, S., Elliot, C., Pyke, E.: *Performance testing of tennis and squash players*. British Journal of Sports Medicine, 8, 80-86, 1974.
- [173] Quintana, D. S., Heathers, J. A. J., Kemp, A. H.: *On the validity of using the Polar RS800 heart rate monitor for heart rate variability research*. Letter to the editor, European Journal of Applied Physiology, DOI 10.1007/s00421-012-2453-2, 2012.
- [174] Ramsbottom, R., Brewer, J., Williams, C.: *A progressive shuttle run test to estimate maximal oxygen uptake*. British Journal of Sports Medicine, 22(4), 141-144, 1988.

- [175] Read, M. T. F., Bellamy, M. J.: *Comparison of hamstring/quadriceps isokenetic strength ratios and power in tennis, squash and track athletes*. British Journal of Sports Medicine, 24, 178-182, 1990.
- [176] Razali, N. M., Wah, Y. B.: *Power Comparisons of Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors and Anderson-Darling Tests*. Journal of Statistical Modeling and Analytics, 2, 21-33, 2011.
- [177] Rehhagel, J.: *Entwicklung einer Testbatterie zur Diagnostik und Steuerung der Schnelligkeit im Sportspiel Fußball*. Dissertation, Institut für Bewegungs- und Neurowissenschaften der Deutschen Sporthochschule Köln, 2011.
- [178] Rehner, G., Daniel, H.: *Biochemie der Ernährung*. 3. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 2010.
- [179] Reilly, T., Thomas, V.: *A motion analysis of work-rate in different positional roles in professional football match-play*. Journal of Human Movement Studies, 2, 87-97, 1976.
- [180] Reilly, T., Halsall, D. L.: *Physiological effects of squash participation in different age-groups and levels of play*. In: *Science and Racket Sports*. Reilly, T., Hughes, M., Lees, A. (eds.), 44-48, Taylor & Francis, 1995.
- [181] Van Rensburg, J. P., Linde, V. D., Ackermann, P. C., Kielblock, A. J., Strydom, N. B.: *Physiological profile of squash players*. Pan African Medical Journal, 62, 721-723, 1982.
- [182] Ribbecke, T.: *Regenerationstrategien. Neue Reserven durch systematische Erholung und Monitoring*. Pflaum Verlag, München 2018.
- [183] Roetert, E. P., Brown, S. W., Piorkowski, P. A., Woods, R. B.: *Fitness Comparisons Among Three Different Levels of Elite Tennis Players*. The Journal of Strength & Conditioning Research: August 1996.
- [184] Rohmert, W.: *Das Belastungs-Beanspruchungs-Konzept*. Zeitschrift für Arbeitswissenschaft, 38, 193-200, 1984.
- [185] Rossiter, H. B., Ward, S. A., Kowalchuk, J. M., Howe, F. A., Griffiths, J. R., Whipp, B. J.: *Dynamic asymmetry of phosphocreatine concentration and O₂ uptake between the on- and off-transients of moderate and high-intensity exercise in humans*. Journal of Physiology, 541 (3), 991–1002, 2002.
- [186] Rositter, H. B.: *Exercise: Kinetic considerations for gas exchange*. American Physiological Society, Comprehensive Physiology, 1, 203-244, 2011.

- [187] Roth, K., Willimezik, K.: *Bewegungslehre*. Rowohlt, Reinbek, 1999.
- [188] Rost, R.: *Sport- und Bewegungstherapie bei Inneren Krankheiten. Lehrbuch für Sportlehrer, Übungsleiter, Physiotherapeuten und Sportmediziner*. 3. Auflage, Deutscher Ärzte-Verlag, Köln 2005.
- [189] Röcker, K.: *Streit um des Kaisers Bart. Welche Laktatschwelle ist die beste?* Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin, 59(12), 303-304, 2008.
- [190] Röcker, K.: *Die sportmedizinische Laktatdiagnostik: Technische Rahmenbedingungen und Einsatzbereiche*. Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin, 62(12), 267-371, 2013.
- [191] Sahlin, K., Harris, R. C., Nylin, B.: *Lactate content and pH in muscle obtained after dynamic exercise*. Pflügers Archiv, 367, 143–149, 1976.
- [192] Sander, A.: *Effekte eines zweijährigen Krafttrainings auf die Sprintleistung im Nachwuchsleistungssport Fußball*. Dissertation, Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main, 2015.
- [193] Sanderson, F. H., Way, K. I. M.: *The development of objective methods of game analysis in squash rackets*. British Journal of Sports Medicine, 11, 188, 1979.
- [194] Saziorski, V. M.: *Biomechanische Grundlagen der Ausdauer*. Sportverlag, 1. Auflage, Berlin 1987.
- [195] Scharhag-Rosenberger, F., Schommer, K.: *Die Spiroergometrie in der Sportmedizin*. Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin, 64(12), 362-366, 2013.
- [196] Schmidt, R. F., Thews, G., Lang, F.: *Physiologie des Menschen*. 28., korrigierte und aktualisierte Auflage, Springer-Lehrbuch, 2000.
- [197] Schwarz, S., Gitt, A.: *Spiroergometrie in der Pneumologie*. In: *Ergometrie*. Löllgen, H., Erland, E., Gitt, A. K. (eds.), 185-195, Springer-Verlag, 2010.
- [198] Scott, B., Fountaine, C.: *Estimating the Energy Costs of Intermittent Exercise*. Journal of Human Kinetics, 107-113, 2013.
- [199] Shapiro, S. S., Wilk, M. B.: *An analysis of variance test for normality (complete samples)*. Biometrika, 52(3-4), 591-611, 1965.
- [200] Sharp, N. C. C.: *Physiological demands and fitness for squash*. In: *Science and Racket Sports II*. Lees, A., Maynard, I., Hughes, M., Reilly, T. (eds.), 4-13, E & FN Spon, 1998.
- [201] Sheppard, J. M., Young, W. B.: *Agility literature review: classifications, training and testing*. Journal of Sports Science, 24(9), 919-932, 2006.

- [202] Seifert, J.: *Effektgrößen in Varianzanalytischen Designs*. User Interface Design GmbH, Ludwigsburg, 2008.
- [203] Seiler, S., Sjursen, E. P.: *Effect of work duration on physiological and rating scale of perceived exertion responses during self-paced interval training*. Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports, 14(5), 318-325, 2004.
- [204] Smekal, G., Von Duvillard, S. P., Rihacek, C., Pokan, R., Hofmann, P., Baron, R., Tschann, H., Bachl, N.: *A physiological profile of tennis match play*. Medicine & Science in Sports & Exercise, American College of Sports Medicine, 2001.
- [205] Spencer, M., Bishop, D., Dawson, B., Goodman, C., Duffield, R.: *Metabolism and Performance in Repeated Cycle Sprints: Active versus Passive Recovery*. Medicine & Science in Sports & Exercise, American College of Sports Medicine, 1492-1499, 2006.
- [206] Sperlich, B., Hoppe, M. W., Haegeler, M.: *Ausdauertraining - Dauermethode versus intensive Intervallmethode im Fußball*. Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin, 64(1), 10-17, 2013.
- [207] Stegemann, J.: *Leistungsphysiologie*. Thieme, Stuttgart 1991.
- [208] Steininger, K., Wodick, R. E.: *Sport-specific fitness testing in squash*. British Journal of Sports Medicine, 21, 23-26, 1987.
- [209] Suchomel, A.: *A Comparison of Exercise Intensity on Different Player Levels in Table Tennis*. International Journal of Table Tennis Sciences, 6, 79-81, 2010.
- [210] Tabata, I., Irisawa, K., Kouzaki, M., Nishimura, K., Ogita, F., Miyachi, M.: *Metabolic profile of high intensity intermittent exercises*. Medicine & Science in Sports & Exercise, 29(3), 390-395, 1997.
- [211] Tesch, P. A., Thorsson, A., Fujitsuka, N.: *Creatine phosphate in fibre types of skeletal muscle before and after exhaustive exercise*. Journal of Applied Physiology, 66(4): 1756-1759, 1989.
- [212] Torres-Luque, G., Sanchez-Pay, A., Bazaco, M. J., Moya, M.: *Functional aspects of competitive tennis*. Journal of Human Sport Exercise, 6(3), 528-539, 2011.
- [213] Todd, M. K., Mahoney, C. H.: *Determination of pre-season physiological characteristics of elite male squash players*. In: *Science and Racket Sports*. Taylor & Francis, 81-85, 1995.

- [214] Todd, M. K., Mahoney, C. H., Wallace, W. F. M.: *Portable telemetry as a method of measuring energy cost during work in high level Squash*. In: *Contemporary Ergonomics*, Robertson, S. A., Taylor & Francis, 439-445, 1996.
- [215] Trapp, E. G., Chisholm, D. J., Boutcher, S. H.: *Metabolic response of trained and untrained women during high-intensity intermittent cycle exercise*. *American Journal of Physiological Regulation, Integrative and Competitive Physiology*, 293, R2370–R2375, 2007.
- [216] Tschopp, M., Held, T., Villiger, B., Bernard, M.: *Qualitätsstandards in der Ausdauerleistungsdiagnostik*. *Schweizerische Zeitschrift für Sportmedizin und Sporttraumatologie*, 49(2), 57-66, 2001.
- [217] Ullmer, H.-V.: *Belastung und Beanspruchung, Beanspruchungsregulation und Zielantizipation*. Vortragsmanuskript auf der 4. Jenaer Arbeitstagung Motodiagnostik-Mototherapie vom 20.-21.7.2001 - überarbeitete Fassung zum Text des Referatebands, 82 - 87, Mainz, 2001.
- [218] Vučkovič, G., Dezman, B.: *Motion analysis of the International and National rank squash players*. auf: <http://vision.fe.uni-lj.si/docs/janezp/1104.pdf>, 2003. Letzter Zugriff: 09.05.2018.
- [219] Vučkovič, G., Dežman, B., Erčulj, F., Kovačič, S., Perš. J.: *Differences between the winning and the losing players in a squash game in terms*. In: *Science and Racket Sports III*. Lees, A., Khan, J.-F., Maynard, I. (eds.), 247-254, Routledge, London 2004.
- [220] Verkhoshansky, Y. V.: *Supertraining*. Bertrams Print on Demand, 2009.
- [221] Vučkovič, G., Dežman, B., Erčulj, F., Kovačič, S., Perš. J.: *Monitoring the time and frequency of players staying on the basic T-position in squash*. In: *Science and Racket Sports III*. Lees, A., Khan, J.-F., Maynard, I. (eds.), 247-254, Routledge, London 2004.
- [222] Vučkovič, G., Dežman, B., Erčulj, F., Kovačič, S., Perš. J.: *Quantitative analysis of playing efficiency in squash*. In: *Science and Racket Sports IV*. Lees, A., Cabello, D., Torres, G. (eds.), 220-226, Routledge, New York 2009.
- [223] Vučkovič, G., James, N., Murray, S., Sporiš, G., Perš., J.: *Tactical use of the T area in squash by players of differing standard*. *Journal of Sports Science*, 27(8), 863-871, 2009.
- [224] Vučkovič, G., James, N.: *The distance covered by winning and losing players in elite squash matches*. *Kinesiologia Slovenica*, 16, 1-2, 44–50, 2010.

- [225] Vučković, G., James, N., Highes, M., Murray, S., Sporiš, G., Perš. J.: *The effect of court location and available time on the tactical shot selection of elite squash players*. Journal of Sports Science and Medicine, 12, 66-73, 2013.
- [226] Wahl, P., Bloch, W., Mester, J.: *Moderne Betrachtungsweisen des Laktats: Laktat ein überschätztes und zugleich unterschätztes Molekül*. Schweizerische Zeitschrift für Sportmedizin und Sporttraumatologie, 57(3), 100-107, 2009.
- [227] Wahl, P., Hägele, M., Zinner, C., Bloch, W., Mester, J.: *High Intensity Training (HIT) für die Verbesserung der Ausdauerleistungsfähigkeit von Normalpersonen und im Präventions- & Rehabilitationsbereich*. Wiener Medizinische Wochenschrift, 160(23-24), 627-636, 2010.
- [228] Wallén, M. B., Hasson, D., Theorell, T., Canlon, B., Osika, W.: *Possibilities and limitations of the Polar RS800 in measuring heart rate variability at rest*. European Journal of Applied Physiology, 112(3), 1153-1165, 2012.
- [229] Weineck, J.: *Optimales Training*. 16., durchgesehene Auflage, Spitta-Verlag, Balingen 2010.
- [230] Walter, W.: *Analysis I*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 1990.
- [231] WHO. Obesity: *Preventing and managing the global epidemic*. WHO Technical Report Series 894, Genf 2000.
- [232] Wiemann, K.: *Praktische Hinweise zur Anwendung statistischer Methoden bei einfach strukturierten bewegungs- und trainingswissenschaftlichen Experimenten*. Universität Wuppertal, 1998. <http://www.biowiss-sport.de/stat.PDF>. Letzter Zugriff: 07.08.2017.
- [233] Wilkinson, M., Leedale-Brown, D., Winter, E. M.: *Validity of squash-specific test of change of direction speed*. International Journal of Sports Physiology and Performance, 4, 176-185, 2009.
- [234] Wilkinson, M., Cookie, M., Murray, S., Thompson, K. G., St. Clair Gibson, A., Winter, E. M.: *Physiological correlates of multiple-sprint-ability and performance in international-standard squash players*. Journal of Strength and Conditioning Research, 26(2), 540-547, 2012.
- [235] Winter, E. M., Fairly, R. T. D., Kidd, D.: *The relationship of VO₂max to fat free mass and running performance in competitive squash players*. Proc. Sport Sci. Conf., Belford College, B1, 1-5, 1984.
- [236] Winter, E. M., Bromley, P. D., Davison, R., Jones, A. M., Mercer, T. H.: *General-principles: Rationale*. In: *Sport and Exercise Physiology Testing Guidelines*.

Winter, E. M., Bromley, P. D., Davison, R., Jones, A. M., Mercer, T. H. (eds.), Routledge, 7-10, 2007.

- [237] Wollstein, J., Ellis, L.: *Applied physiology and fitness training for all squash players*. Australian Squash Coach, 5-7, 1995.
- [238] Wonisch, M., Hofmann, P., Förster, H., Hörtnagl, H., Ledl-Kurkoswski, E., Pokan, R. (eds.): *Kompendium der Sportmedizin: Physiologie, Innere Medizin und Pädiatrie*. Springer-Verlag GmbH Austria, Wien 2017.
- [239] Yadav, S. K. S.: *Relationship of selected motor fitness variables with the performance of badminton players*. International Journal of Physical Education, Sports and Health, 4(2), 145-147, 2017.
- [240] Zagatto, A. M., Morel, E. A., Gobatto, C. A.: *Physiological Responses and Characteristics of Table Tennis Matches Determined in Official Tournaments*. Journal of Strength and Conditioning Research, 24(4), 942-949, 2010.
- [241] Zagatto, A. M., Vieira de Mello Leite, J., Papoti, M., Beneke, R.: *Energetics of Table Tennis and Table Tennis Specific Exercise Testing*. International Journal of Sports, Physiology & Performance, 12, 2016.
- [242] Zug, J.: *Squash: A History of the Game*. Scribner, New York 2003.

Elektronische Medien:

- [243] Robert-Koch-Institut, Statistica 2018 auf <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/260920/umfrage/mittelwerte-von-groesse-gewicht-und-bmi-bei-maennern-nach-alter/>. Letzter Zugriff: 20.04.2018.
- [244] SRA des DSQV: *Squasregeln für das Einzel*. 28.08.2012. auf: <http://www.worldsquash.org/ws/wp-content/uploads/2012/09/Rules-in-German.pdf>. Letzter Zugriff: 06.01.2018.
- [245] EKF-diagnostic, 2017. Biosen C-Line auf <https://www.ekfdiagnostics.de/wp-content/uploads/2017/02/BS-Data-DE-4.1-02.17.pdf>. Letzter Zugriff am 20.03.2018.

Anhang

A Berechnungs- und Beurteilungstabellen

A.1 Tabellen zur Berechnung des energetischen Profils

Tabelle A.1: Kalorisches Äquivalent in Abhängigkeit des respiratorischen Quotientens.

Respiratorischer Quotient	Kalarisches Äquivalent [J ml⁻¹]
RER < 0,7001	19,586
0,700 < RER < 0,7101	19,636
0,710 < RER < 0,7201	19,686
0,720 < RER < 0,7301	19,737
0,730 < RER < 0,7401	19,791
0,740 < RER < 0,7501	19,841
0,750 < RER < 0,7601	19,896
0,760 < RER < 0,7701	19,946
0,770 < RER < 0,7801	19,996
0,780 < RER < 0,7901	20,051
0,790 < RER < 0,8001	20,101
0,800 < RER < 0,8101	20,151
0,810 < RER < 0,8201	20,201
0,820 < RER < 0,8301	20,256
0,830 < RER < 0,8401	20,306
0,840 < RER < 0,8501	20,360
0,850 < RER < 0,8601	20,411
0,860 < RER < 0,8701	20,461
0,870 < RER < 0,8801	20,515
0,880 < RER < 0,8901	20,566
0,890 < RER < 0,9001	20,616
0,900 < RER < 0,9101	20,666
0,910 < RER < 0,9201	20,716
0,920 < RER < 0,9301	20,767
0,930 < RER < 0,9401	20,821
0,940 < RER < 0,9501	20,871
0,950 < RER < 0,9601	20,921
0,960 < RER < 0,9701	20,076
0,970 < RER < 0,9801	21,026
0,980 < RER < 0,9901	21,076
0,990 < RER	21,131

Tabelle A.2: Grenzwerte der Sauerstoffaufnahme zur Rephosphorylierung von Kreatinphosphat in der Nachbelastung.

Proband Nr.	Alter [Jahre]	Körpergewicht [kg]	VO _{2PCr_{min}} [ml]	VO _{2PCr_{Norm}} [ml]	VO _{2PCr_{max}} [ml]
1	17	77,2	2742	2964	4150
2	19	65,2	2316	2504	3505
3	51	83,1	2952	3191	4467
4	18	79,7	2831	3060	4285
5	18	82,6	2934	3171	4441
6	17	77,1	2739	2961	4145
7	24	72,3	2568	2776	3887
8	26	75,2	2671	2888	4043
9	18	70,1	2499	2692	3769
10	26	82,5	2940	3168	4435
11	18	66,7	2369	2561	3586
12	49	86,0	3055	3302	4623
1	41	73,0	2593	2803	3924
2	37	81,3	2888	3122	4371
3	61	89,9	3193	3452	4833
4	29	75,1	2668	2884	4037
5	39	85,7	3044	3291	4607
6	37	83,7	2973	3214	4500
7	62	83,6	2969	3210	4494
8	56	83,8	2977	3218	4505
9	48	78,8	2799	3026	4236
10	49	84,1	2987	3229	4521

A.2 Formeln zur Normwertberechnung

Normwertberechnung zur altersspezifischen maximalen Herzfrequenz nach Röcker et al. (2002):

$$HR_{\max\text{Norm}} := HR_{\max} [\text{bpm}] = 207 - (\text{Alter} \cdot 0,75).$$

Normwertberechnung zur maximalen Sauerstoffaufnahme unter Berücksichtigung von Alter und Gewicht für Männer nach Wassermann mit Angabe des Alters in Jahren, der Körpergröße in Zentimeter und des Gewichts in Kilogramm:

1. Berechnung des Idealgewichts der Probanden:

$$\text{Idealgewicht} = 0,79 \cdot \text{Körpergröße} - 60,7.$$

2. Berechnung des altersspezifischen Sollwertes für die maximale Sauerstoffaufnahme:

- (a) Falls Gewicht = Idealgewicht:

$$\dot{V}O_{2\max\text{Norm}} = \text{Idealgewicht} \cdot (50,72 - 0,372 \cdot \text{Alter}).$$

- (b) Falls Gewicht < Idealgewicht:

$$\dot{V}O_{2\max\text{Norm}} = 0,5 \cdot (\text{Idealgewicht} + \text{Gewicht}) \cdot (50,72 - 0,372 \cdot \text{Alter}).$$

- (c) Falls Gewicht > Idealgewicht:

$$\begin{aligned} \dot{V}O_{2\max\text{Norm}} &= (\text{Idealgewicht} \cdot (50,72 - 0,372 \cdot \text{Alter})) \\ &\quad + 6 \cdot (\text{Gewicht} - \text{Idealgewicht}). \end{aligned}$$

A.3 Normwerttabellen zur Beurteilung der Leistungen innerhalb der sportmotorischen Testbatterie

Normwerttabelle Fallstabtest

4 Punkte ausgezeichnet	3 Punkte überdurchschnittlich	2 Punkte durchschnittlich	1 Punkt unterdurchschnittlich	0 Punkte schlecht
< 14 cm	14 – 18 cm	19 – 22 cm	23 – 28 cm	> 28 cm

Abbildung A.3.1: Normwerttabelle Fallstabtest adaptiert nach Loosch (1999).

Normwerttabelle Sit-and-Reach-Test

Category Sex	Age									
	20–29		30–39		40–49		50–59		60–69	
	M	F	M	F	M	F	M	F	M	F
Excellent	40	41	38	41	35	38	35	39	33	35
Very good	39	40	37	40	34	37	34	38	32	34
	34	37	33	36	29	34	28	33	25	31
Good	33	36	32	35	28	33	27	32	24	30
	30	33	28	32	24	30	24	30	20	27
Fair	29	32	27	31	23	29	23	29	19	26
	25	28	23	27	18	25	16	25	15	23
Needs improvement	24	27	22	26	17	24	15	24	14	22
M, male; F, female.										
^a Note: These norms are based on a sit-and-reach box in which the zero point is set at 26 cm. When using a box in which the zero point is set at 23 cm, subtract 3 cm from each value in this table. Source: <i>Canadian Physical Activity, Fitness & Lifestyle Approach: CSEP-Health & Fitness Program's Appraisal & Counseling Strategy</i> , 3rd ed, © 2003. Used with permission from the Canadian Society for Exercise Physiology.										

Abbildung A.3.2: Normwerttabelle Sit-and-Reach-Test nach den ACSM's-Guidelines for Exercise Testing (2009), Teil A.

Category Sex	Age									
	20–29		30–39		40–49		50–59		60–69	
	M	F	M	F	M	F	M	F	M	F
Excellent	40	41	38	41	35	38	35	39	33	35
Very good	39	40	37	40	34	37	34	38	32	34
	34	37	33	36	29	34	28	33	25	31
Good	33	36	32	35	28	33	27	32	24	30
	30	33	28	32	24	30	24	30	20	27
Fair	29	32	27	31	23	29	23	29	19	26
	25	28	23	27	18	25	16	25	15	23
Needs improvement	24	27	22	26	17	24	15	24	14	22
M, male; F, female.										
<p>^aNote: These norms are based on a sit-and-reach box in which the zero point is set at 26 cm. When using a box in which the zero point is set at 23 cm, subtract 3 cm from each value in this table.</p> <p>Source: <i>Canadian Physical Activity, Fitness & Lifestyle Approach: CSEP-Health & Fitness Program's Appraisal & Counseling Strategy</i>, 3rd ed, © 2003. Used with permission from the Canadian Society for Exercise Physiology.</p>										

Abbildung A.3.3: Normwerttabelle Sit-and-Reach-Test nach den ACSM's-Guidelines for Exercise Testing (2009), Teil B.

Table 3 Sit-and-Reach Flexibility Norms and Percentiles (%ile) in Canadian Men (M) and Women (W) Ages 15–69													
Age (y)	%ile	15–19		20–29		30–39		40–49		50–59		60–69	
		M	W	M	W	Sit and Reach (cm) ^a		M	W	M	W	M	W
High	81–100	38	42	39	40	37	40	34	37	34	38	32	34
>Ave	61–80	34–38	38–42	34–39	37–40	33–37	36–40	29–34	34–37	28–34	33–38	26–32	31–34
Ave	41–60	29–33	34–37	30–33	33–36	28–32	32–35	24–28	30–33	24–27	30–32	20–24	27–30
<Ave	21–40	24–28	29–33	25–29	28–32	23–27	27–31	18–23	25–29	16–23	25–29	15–19	23–26
Low	1–20	24	29	25	28	23	27	18	25	16	25	15	23

Note: ^aIndex line (heel-line) is at 26 cm.
From *Fitness and Lifestyle in Canada*, Fitness and Lifestyle Research Institute, 1983. Fitness and Amateur Sport, Ottawa, Canada.

Abbildung A.3.4: Normwerttabelle Sit-and-Reach-Test nach dem Fitness and Lifestyle Research Institute in Canada (1983).

Normwerttabelle Einbeinstand

Alter	4 Punkte ausgezeichnet	3 Punkte überdurchschnittlich	2 Punkte durchschnittlich	1 Punkt unterdurchschnittlich	0 Punkte schlecht
15 – 49 Jahre	0 Kontakte	1 – 3 Kontakte	4 – 7 Kontakte	8 – 11 Kontakte	> 11 Kontakte
50 – 60 Jahre	< 2 Kontakte	2 – 5 Kontakte	6 – 11 Kontakte	12 – 17 Kontakte	> 17 Kontakte

Abbildung A.3.5: Normwerttabelle für Männer nach Beck & Bös (1995).

Normwerttabelle Sprinttest

Geschlecht	4 Punkte ausgezeichnet	3 Punkte überdurchschnittlich	2 Punkte durchschnittlich	1 Punkt unterdurchschnittlich	0 Punkte schlecht
Männer	< 4 s	4,0 – 4,2 s	4,3 – 4,4 s	4,5 – 4,6 s	> 4,6 s
Frauen	< 4 second	4,0 – 4,6 s	4,7 – 4,8 s	4,9 – 5,0 s	> 5,0 s

Abbildung A.3.6: Normwerttabelle 30 m-Sprinttest nach Davis (2000).

Normwerttabelle Jump-and-Reach

Alter [Jahre]	Leistungsbeurteilung [Jungen / Männer]				
	4 Punkte	3 Punkte	2 Punkte	1 Punkt	0 Punkte
	weit überdurchschnittlich	überdurchschnittlich	durchschnittlich	unterdurchschnittlich	weit unterdurchschnittlich
6	zur Zeit keine Normdaten verfügbar				
7	> 31	25 - 31	18 - 24	11 - 17	< 11
8	> 31	26 - 31	21 - 25	15 - 20	< 15
9	> 31	27 - 31	23 - 26	18 - 22	< 18
10	> 30	30 - 30	26 - 29	20 - 25	< 20
11	> 38	33 - 38	28 - 32	22 - 27	< 22
12	> 40	35 - 40	30 - 34	24 - 29	< 24
13	> 42	37 - 42	32 - 36	26 - 31	< 26
14	> 43	39 - 43	33 - 38	28 - 32	< 28
15 - 18	> 57	50 - 57	43 - 49	35 - 42	< 35
19 - 25	> 62	56 - 62	49 - 55	42 - 48	< 42
26 - 30	> 60	54 - 60	46 - 53	39 - 45	< 39
31 - 35	> 56	50 - 56	42 - 49	34 - 41	< 34
36 - 40	> 53	46 - 53	38 - 45	30 - 37	< 30

Abbildung A.3.7: Normwerttabelle Jump-and-Reach-Tests nach Beck & Bös (1995).

Normwerttabelle Standweitsprung

Alter [Jahre]	Leistungsbeurteilung [Jungen / Männer]				
	4 Punkte weit überdurchschnittlich	3 Punkte überdurchschnittlich	2 Punkte durchschnittlich	1 Punkt unterdurchschnittlich	0 Punkte weit unterdurchschnittlich
6	> 133	117 - 133	99 - 116	82 - 98	< 82
7	> 141	124 - 141	105 - 123	86 - 104	< 86
8	> 154	135 - 154	115 - 134	95 - 114	< 95
9	> 161	143 - 161	123 - 142	104 - 122	< 104
10	> 177	158 - 177	139 - 157	119 - 138	< 119
11	> 186	168 - 186	150 - 167	131 - 149	< 131
12	> 195	176 - 195	156 - 175	136 - 155	< 136
13	> 206	185 - 206	163 - 184	141 - 162	< 141
14	> 225	200 - 225	174 - 199	148 - 173	< 148
15 - 18	> 244	216 - 244	187 - 215	158 - 186	< 158
19 - 25	> 258	239 - 258	219 - 238	199 - 218	< 199
26 - 30	> 256	236 - 256	215 - 235	194 - 214	< 194
31 - 35	> 252	234 - 252	214 - 233	195 - 213	< 195
36 - 40	> 244	228 - 244	210 - 227	192 - 209	< 192

Abbildung A.3.8: Normwerttabelle Standweitsprung nach Beck & Bös (1995).

Normwerttabelle Medizinballstoßen 1 kg

4 Punkte ausgezeichnet	3 Punkte überdurchschnittlich	2 Punkte durchschnittlich	1 Punkt unterdurchschnittlich	0 Punkte schlecht
750 – 850 cm	670 – 740 cm	610 – 660 cm	490 – 600 cm	410 – 480 cm

Abbildung A.3.9: Normwerttabelle Medizinballstoßen (1kg) nach Beck & Bös (1995).

MALES									
AGE 60-69					AGE 70-79				
	Balke Treadmill (time)	Max $\dot{V}O_2$ (mL/kg/ min)	12 min Run (miles)	1.5 Mile Run (time)	Balke Treadmill (time)	Max $\dot{V}O_2$ (mL/kg/ min)	12 min Run (miles)	1.5 Mile Run (time)	
%									
99	25:02	51.1	1.74	10:09	24:00	49.7	1.69	10:27	
95	21:33	46.1	1.60	11:20	19:00	42.4	1.49	12:25	S
90	19:30	43.2	1.51	12:10	17:00	39.5	1.41	13:25	
85	18:00	41.0	1.45	12:53	16:00	38.1	1.37	13:57	
80	17:00	39.5	1.41	13:25	14:34	36.0	1.32	14:52	E
75	16:00	38.1	1.37	13:58	13:25	34.4	1.27	15:38	
70	15:00	36.7	1.33	14:33	12:27	33.0	1.23	16:22	
65	14:30	35.9	1.31	14:55	12:00	32.3	1.21	16:46	
60	13:51	35.0	1.29	15:20	11:00	30.9	1.17	17:37	G
55	13:04	33.9	1.26	15:53	10:30	30.2	1.15	18:05	
50	12:30	33.1	1.23	16:19	10:00	29.4	1.13	18:39	
45	12:00	32.3	1.21	16:46	9:20	28.5	1.11	19:19	
40	11:21	31.4	1.19	17:19	9:00	28.0	1.09	19:43	F
35	10:49	30.6	1.17	17:49	8:21	27.1	1.07	20:28	
30	10:00	29.4	1.13	18:39	7:38	26.0	1.04	21:28	
25	9:29	28.7	1.11	19:10	7:00	25.1	1.01	22:22	
20	8:37	27.4	1.08	20:13	6:00	23.7	0.97	23:55	P
15	7:33	25.9	1.03	21:34	5:00	22.2	0.93	25:49	
10	6:20	24.1	0.99	23:27	4:00	20.8	0.89	27:55	
5	4:55	22.1	0.93	25:58	3:00	19.3	0.85	30:34	
1	2:29	18.6	0.83	31:59	2:00	17.9	0.81	33:30	VP
n = 2,682					n = 467				
Total n = 3,149									

S, Superior; E, excellent; G, good; F, fair; P, poor; VP, very poor.

Reprinted with permission from the Cooper Institute, Dallas, TX. For more information: www.cooperinstitute.org.

Abbildung A.3.10: Normwerttabellen maximale Sauerstoffaufnahme nach den ACSM's-Guidelines for Exercise Testing (2009).

B Einzelfallanalysen

B.1 Verletzung des ersten Validitätskriteriums im Berechnungsmodell der Sauerstoffaufnahme der schnellen Komponente der EPOC

Wegen

$$\dot{V}O_{2PCrNB} = 3660 \text{ ml} < 3168 \text{ ml} = \dot{V}O_{2PCrNorm}$$

überstieg der Proband den berechneten Normwert zur individuell benötigten Sauerstoffmenge zur vollständigen Rephosphorylierung des Kreatinphosphats in der Muskulatur. Aus diesem Grund wurde zunächst die Validität der Modellfunktion aus statistischer Perspektive überprüft. Die Modellierung der Sauerstoffkinetik in der Nachbelastung nach Spielende per nichtlinearer Regression ergab für den Probanden die folgenden Modellparameter: $a = 4670 \text{ ml min}^{-1}$, $\tau_a = 0,9 \text{ min}$, $b = 679 \text{ ml min}^{-1}$, $\tau_b = 15,5 \text{ min}$ und $c = 225 \text{ ml min}^{-1}$. Die Korrelation zwischen Modellfunktion und Datenwolke der Messwerte der Sauerstoffaufnahme in der Nachbelastung war mit $R^2 = 0,941$ sehr hoch. 94,1 % der Datenpunkte konnten folglich durch die Modellfunktion erklärt werden. Die zusätzliche, visuelle Residualanalyse ergab, dass die Residuen mit homogener Varianz für den Prädiktor Zeit um Null variierten. Aus statistischer Perspektive wurde die Modellfunktion somit als valide bewertet. Unter Berücksichtigung des Phänotypen und der körperlichen Leistungsfähigkeit bzw. des Fitnesszustandes des Probanden im Testzeitraum erschien der berechnete Normwert darüber hinaus als obere Grenze potentiell zu gering zu sein. Die Berechnung der Normwerte beruhte wie in Kapitel 11.4.2 beschrieben auf der Annahme eines Muskelanteils von 40 % der individuellen Körpermasse und einer Menge von 20 mmol Kreatinphosphat pro kg Muskelfeuchtmasse. Da der Proband im Testzeitraum eine ausgezeichnete körperliche Leistungsfähigkeit aufwies ($\text{rel } \dot{V}O_{2max}$ von $\sim 64 \text{ ml kg}^{-1} \text{ min}^{-1}$, Topwerte bzgl. der Beweglichkeit, Koordination und Kraft der oberen Extremitäten, sehr gute Kraftwerte der unteren Extremitäten, sowie einem per 3-Faltenmethode gemessenen Körperfettanteil von 8,09 % bei vergleichbar hohem Körpergewicht) kann davon ausgegangen werden, dass in Relation zu den zur Berechnung herangezogenen Durchschnittswerten sowohl der Muskelanteil als auch die Menge an Kreatinphosphat pro kg Muskelfeuchtmasse erhöht waren. Rechnerisch lässt sich ein Wert von $\dot{V}O_{2PCrNB} = 3660 \text{ ml}$ im jeweiligen Extrem durch einen Muskelanteil von 46 % bei 20 mmol Kreatinphosphat pro kg Muskelfeuchtmasse oder durch $\sim 23 \text{ mmol}$ Kreatinphosphat pro kg der Muskelfeuchtmasse bei einem Muskelanteil

von von 40 % der Körpermasse erklären. Realistisch erscheint jedoch vermutlich vor dem Hintergrund der individuellen Physiologie des Probanden eine Erhöhung beider Parameter. Somit wurde das Modell auch aus physiologischer Perspektive als valide bewertet. Betrachtet man zusätzlich die Belastung am Satzende, so geht der Nachbelastungsphase mit 50,20 s ein sehr langer Ballwechsel voraus.

C Technische Daten

C.1 Maße der Sit-and-Reach-Box

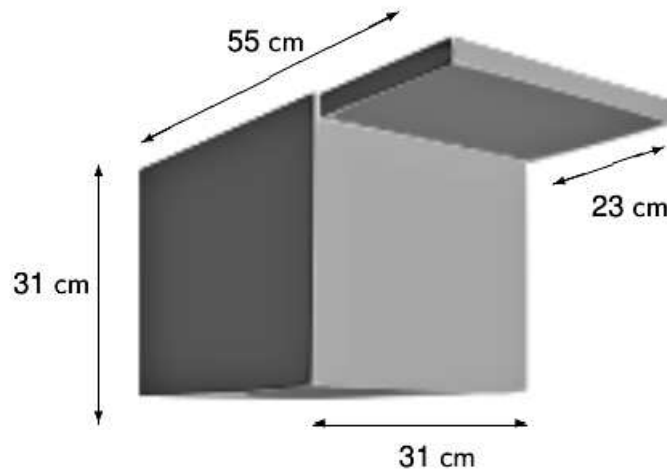


Abbildung C.1.1: Maße der innerhalb der Studie verwendeten Sit-and-Reach-Box.

C.2 Maße der T-Schiene

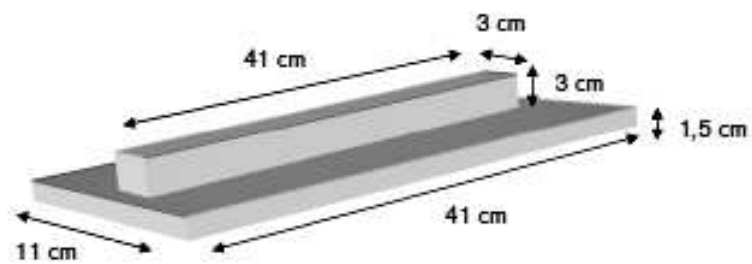


Abbildung C.2.1: Maße der innerhalb der Studie verwendeten T-Schiene.

Urheberschaftserklärung

Ich versichere, dass ich die vorgelegte Dissertation selbst und ohne fremde Hilfe verfasst, nicht andere als die in ihr angegebenen Quellen oder Hilfsmittel benutzt, alle vollständig oder sinngemäß übernommenen Zitate als solche gekennzeichnet sowie die Dissertation in der vorliegenden oder einer ähnlichen Form noch bei keiner anderen in - oder ausländischen Hochschule anlässlich eines Promotionsgesuchs oder zu anderen Prüfungszwecken eingereicht habe.

(Katharina Dunst)